

**Wuppertaler Expositions-Abschätzung:
Konzept zur rechnerischen Beurteilung
betrieblicher Gefahrstoffexpositionen unter
Einbeziehung ausgewählter
Brandschutzingenieurmodelle**



**Dissertation
zur Erlangung eines Doktorgrades**

im

**Fachbereich D - Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,
Sicherheitstechnik**

der

**Bergischen Universität Wuppertal
- Abteilung Sicherheitstechnik -**

vorgelegt von
M.Sc. Florian Pillar

aus
Haan

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl
Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Udo Eickmann

Tag der mündlichen Prüfung:
26.03.2015

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20150409-154729-8

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20150409-154729-8>]

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IX
Abstract	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung und Zielstellung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielstellung, Hypothesen und methodisches Vorgehen	5
2 Rechtliche Rahmenbedingungen und Schutzzielkonzepte	9
2.1 Produktsicherheit und Arbeitsschutz: Gesetzliche Grundlagen und Schutzzielkonzept	9
2.1.1 Europäische und nationale Rechtssystematik	10
2.1.2 Gefahrstoffe im Regelungsgegenstand der Produktsicherheit	11
2.1.3 Gefahrstoffe im Regelungsgegenstand der Arbeitssicherheit	15
2.1.4 Schutzzielkonzept und stoffspezifische Gefährdungsbeurteilung	16
2.2 Brandschutz: Gesetzliche Grundlagen und Schutzzielkonzept	20
2.2.1 Rechtssystematik des Brandschutzes	20
2.2.2 Schutzzielkonzept und Brandschutznachweis	22
2.3 Vergleich methodischer und sicherheitstechnischer Ansätze des Arbeits- und Brandschutzes	25
3 Darstellung von Modellen und Konzepten zur Expositionsabschätzung	29
4 Beurteilung von Modellen anhand stoffbezogener Anforderungen	31
4.1 Modelle zur Stoffemission	32
4.1.1 Unmittelbare Abschätzung von Emissionen	32
4.1.2 Modell zur Gas-Emission aus Behältern	33
4.1.3 Modell des Sättigungsdampfdrucks (SVP-Modell)	34
4.1.4 Modell der vollständigen Verdunstung (CEM-Modell)	34
4.1.5 Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu	35
4.1.6 Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling	36
4.1.7 Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell	36
4.1.8 Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells CFAST (Zonenmodell)	37
4.1.9 Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells FDS (Feldmodell) . .	38
4.1.10 Zusammenfassender Überblick	39
4.2 Modelle zur Stoffausbreitung	40
4.2.1 Diffusionsmodell	41
4.2.2 Zonenmodelle des Arbeitsschutzes	42
4.2.3 Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)	43

4.2.4	Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs	44
4.2.5	Handrechenmodelle zur Beurteilung der Rauchausbreitung	44
4.2.6	Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell CFAST (Zonenmodell)	46
4.2.7	Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell FDS (Feldmodell)	47
4.2.8	Zusammenfassender Überblick	49
4.3	Konzepte zur Bewertung der Stoffkonzentration am Arbeitsplatz	50
4.4	Informationsermittlung und -strukturierung: Arbeitssystem-Modell	51
4.5	Anmerkungen zu kleinskaligen Verwirbelungen	53
5	Entwicklung eines Konzepts: Wuppertaler Expositions-Abschätzung	55
5.1	Modul 1: Informationsermittlung	56
5.1.1	Erfassung und Strukturierung der Arbeitssituation	56
5.1.2	Parameter zur tätigkeitsspezifischen Modellauswahl	57
5.2	Modul 2: Erfassung der Stoffemission	59
5.2.1	Unmittelbare Abschätzung von Emissionen	59
5.2.2	Modell zur Gas-Emission aus Behältern	60
5.2.3	Verdunstungsmodelle	61
5.2.4	Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell	63
5.2.5	Systematik zur Modellauswahl	64
5.2.6	Anmerkungen zur Berücksichtigung ergänzender Emissionsmodelle	66
5.3	Modul 3: Erfassung der Stoffausbreitung	66
5.3.1	Vorbetrachtung zur Stoffausbreitung: Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs	67
5.3.2	Berechnung der Stoffausbreitung: Methodische Übertragung des Brand- schutzingenieurmodells FDS	68
5.3.3	Vorbetrachtungen mit FDS	72
5.3.4	Anmerkungen zur Berücksichtigung anderer Modelle zur Stoffausbreitung	73
5.4	Modul 4: Bewertung der Arbeitsbedingungen	74
5.5	Verknüpfungspunkte innerhalb der Wuppertaler Expositions-Abschätzung	75
5.6	Plausibilitätsprüfung von (Zwischen-) Ergebnissen	77
5.7	Zusammenfassung der Wuppertaler Expositions-Abschätzung	78
6	Validierung der Wuppertaler Expositions-Abschätzung	81
6.1	Validierungsmethodik	81
6.1.1	Allgemeiner Validierungsansatz	81
6.1.2	Konzeptionelles Vorgehen und Untersuchungsziele	83
6.2	Durchgeführte Validierungsuntersuchungen	85
6.2.1	DGUV-Forschungsprojekt FP 354	86
6.2.2	Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor	105
6.2.3	Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten	119
6.3	Aussagen und Interpretation der Validierungsuntersuchungen	132
6.3.1	Zusammenfassung der Validierungsaussagen	132
6.3.2	Anwendungsbedingungen und Einsatzgrenzen	134
6.3.3	Praktische Einsatzmöglichkeiten	136
7	Fazit und Ausblick	139
7.1	Bewertung anhand wissenschaftlicher Hypothesen	139
7.2	Weiterführende Arbeiten und potentielle Fragestellungen	142

A	Tabellarische Übersichten charakteristischer Parameter	145
A.1	Charakteristische Parameter der strömungsmechanischen Gas-Emission	145
A.2	Charakteristische Parameter der Verdunstung aus Flüssigkeitsoberflächen	146
A.3	Charakteristische Parameter der Verdampfung aus Flüssigkeitsoberflächen	147
A.4	Charakteristische Parameter der Sublimation aus Feststoffoberflächen	148
A.5	Charakteristische Parameter der Diffusion	149
A.6	Charakteristische Parameter der Mitführung in Luftströmungen	150
A.7	Charakteristische Parameter von Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Emissionsvorgänge	152
A.8	Charakteristische Parameter des dichtebedingten Auf- und Abtriebs	153
A.9	Charakteristische Parameter von Arbeitsraum und Tätigkeit	154
B	Vergleiche von Modell-Eingangsgrößen und charakteristischen Parametern	157
B.1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern	157
B.2	Modell des Sättigungsdampfdrucks (SVP-Modell)	158
B.3	Modell der vollständigen Verdunstung (CEM-Modell)	158
B.4	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu	159
B.5	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling	160
B.6	Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell	162
B.7	Diffusionsmodell	163
B.8	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes	164
B.9	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)	165
B.10	Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs	166
B.11	Stoffbezogenes Ausbreitungsmodell des Brandschutzingenieurmodells FDS (Feldmodell)	167
B.12	Modell des Arbeitssystems zur Strukturierung und Informationsermittlung	172
C	Abschließende Darstellung des Arbeitssystems	175
D	Arbeitsschritte zur Parametrisierung des Ausbreitungsmodells FDS	181
E	Auswahlssystematik der Emissionsmodelle	187
F	Arbeitssysteme der Validierungsuntersuchungen	189
F.1	DGUV-Forschungsprojekt FP 354	189
F.2	Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor	202
F.3	Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten	208
G	Datenzusammenfassung der Validierungsuntersuchungen	213
G.1	DGUV-Forschungsprojekt FP 354	213
G.1.1	Experimentelle Rahmenbedingungen	213
G.1.2	Modellparametrisierungen	218
G.2	Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor	226
G.2.1	Experimentelle Rahmenbedingungen	226
G.2.2	Modellparametrisierungen	227
G.3	Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten - Modellparametrisierungen	229
H	Ergebnisdarstellungen der Validierungsuntersuchungen	231
H.1	DGUV-Forschungsprojekt FP 354	231
H.1.1	Untersuchungsschritt 1: Gasfreisetzung Propan	231
H.1.2	Untersuchungsschritt 2: Verdunstung Isopropanol	233

H.1.3	Sensitivitätsuntersuchung: Variation Lüftungsbedingungen	250
H.1.4	Sensitivitätsuntersuchung: Abstimmung Raum- und Zulufttemperaturen .	261
H.1.5	Zusammenfassung statistischer Kennwerte	274
H.2	Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor	277
H.2.1	Konzentrationsverläufe der Versuchsdurchgänge	277
H.2.2	Berechnungen zu Versuchsbedingungen	279
H.2.3	Sensitivitätsuntersuchungen	281
H.2.4	Zusammenfassung statistischer Kennwerte	284
H.3	Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten	285
H.3.1	Konzentrationsverläufe der Versuchsdurchgänge	285
H.3.2	Ergebnisvergleiche der Versuche mit Berechnungen	287
Verwendete Formelzeichen		297
Glossar		303
Literaturverzeichnis		307
Abbildungsverzeichnis		315
Tabellenverzeichnis		317
Lebenslauf		319

Danksagung

“Wenn du in Eile bist, dann gehe langsam”

Fernöstliche Weisheit

Die Erarbeitung einer Dissertation dauert viele Tage, Monate und Jahre, in denen Ausdauer, Motivation und Begeisterung für das eigene Forschungsthema notwendig sind. In dieser Zeit ist die Unterstützung anderer an verschiedenen Zeitpunkten und auf ganz unterschiedlichen Ebenen eine wesentliche Voraussetzung:

Auf den ersten Blick bilden die fachliche Auseinandersetzung, die wissenschaftliche Betreuung und die methodische Diskussion von Erkenntnissen die Grundlagen der wissenschaftlichen Arbeit. In einem guten Forschungsumfeld fördert gerade dieser Austausch die Entwicklung einer selbstständigen Arbeits- und Denkweise, die Formulierung eigener Thesen und die Bildung eines Standpunkts.

Der Weg zur Auseinandersetzung mit einer Forschungsfrage kann allerdings nicht immer mit gleichmäßigem Fortschritt bewältigt werden, sondern birgt oft auch Hürden, Stillstand oder Rückschritte. Erscheinen z.B. Problemlösungen nicht greifbar, ist zur Überwindung dieser Hindernisse große Anstrengung gefragt; die Arbeiten kosten sprichwörtlich “Blut, Schweiß und Tränen”. Zu einer guten wissenschaftlichen Betreuung zählt daher auch ein persönlicher Bezug, die Bestärkung in schweren Phasen und die Unterstützung bei der Überwindung von Schwierigkeiten.

Über die fachliche Betreuung hinaus ist aber auch die Unterstützung und Bestärkung aus dem privaten und persönlichen Umfeld unverzichtbar. Insbesondere in schwierigen Momenten trägt gerade diese Seite durch Aufrichtung, Überbrückung von Motivationslücken und Zerstreuung von Selbstzweifeln ganz wesentlich zum Gelingen einer Promotion bei. Getreu oben stehendem Motto führt nicht die schnelle, sondern die kontinuierliche, durchdachte und saubere Arbeitsweise zu einem Ziel, das mit allen Bereichen des Lebens auf Dauer vereinbar ist. Und neben der fachlichen Arbeit gilt es darüber hinaus, den privaten Lebensweg weiter zu beschreiten und bewusst zu gestalten.

Während der Erstellung dieser Arbeit durfte ich - sowohl in Momenten großer Fortschritte als auch bei fachlichen sowie persönlichen Steinen im Weg - das Glück erfahren, die notwendige Unterstützung von unterschiedlichen Menschen und auf verschiedene Art und Weise zu genießen. Bei der fachlich-methodischen Arbeit, bei Spannungen zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen, aber auch bei Rückschlägen haben diese Personen ganz individuell dazu beigetragen, dass die Dissertation nunmehr in dieser Fassung vorliegt:

Ich danke Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anke Kahl nicht nur für Ihre außerordentliche fachliche Betreuung und Begeisterung für mein Forschungsthema, sondern besonders für die persönliche Unterstützung und Bereitschaft, Sorgen zu teilen und zu bewältigen.

Weiterhin danke ich Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Udo Eickmann neben der Bereitschaft zur

Erstellung des Zweitgutachtens für die fachliche Auseinandersetzung, zahlreiche erkenntnisreiche Diskussionen und das Engagement, Teile der Validierungsuntersuchungen zu ermöglichen. Ganz besonders waren die unterschiedlichen fachlichen Sichtweisen und Argumentationen im Diskurs unverzichtbar.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeitern des Fachgebiets Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit der Bergischen Universität Wuppertal sowie des Fachbereichs Gefahrstoffe der Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege für methodische und fachliche, aber auch persönliche Gespräche und praktische Unterstützung. Ganz besonders gilt dies für Tristan Gusek und Günter Naujoks, ohne die große Teile der Validierungsarbeiten in der dargestellten Form nicht durchführbar gewesen wären.

Weiterer Dank gilt Dr. rer. nat. Christian Monsè (Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung - IPA) und M.Sc. Eike Hellenkamp für die freundliche Bereitstellung von Daten und Erläuterungen der für die weiteren Validierungsuntersuchungen genutzten Versuche. Gleichfalls bedanke ich mich bei der Forschungsförderung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung für die Projektunterstützung.

Einen nicht unwesentlichen Teil haben ebenfalls meine Korrektur-Leser, Dipl.-Ing. Ulrich Windhövel und M.Sc. Thomas Tremmel, beigetragen, die so manche Formulierung auseinander dividieren mussten. Auch euch gehört mein - sprachstilistischer - Dank!

Neben der fachlichen Unterstützung möchte ich aber auch den lieben Menschen danken, die nicht nur "Blut" und "Schweiß", sondern vor allem "Tränen" ertragen und getrocknet haben. In Anlehnung an obiges Zitat habt ihr es mir ermöglicht, meine Schritte teils zu mäßigen, aber teils auch überhaupt einen Fuß vor den anderen setzen zu können.

An erster Stelle sind dies meine Eltern Anke und Norbert Pillar, aber auch andere Familienmitglieder; weiterhin meine lieben und engen Freunde Silvia mit Ben, Maren, Anna und Thomas. Für Ihre Unterstützung möchte ich auch Petra Kelle und Dr. med. Olaf Baer danken. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch Dipl.-Ing. Matthias Dietrich, Dipl.-Ing. Stefan Rassek und Dominik Renner sowie dem Team von Rassek & Partner Brandschutzingenieure für Unterstützung, Flexibilität und das "Rücken-Freihalten" in der Brandschutz-Arbeit.

Abschließend schulde ich meinem linken Schlüsselbein Dank dafür, den praktischen Eigenversuch zur Massenträgheit nicht überstanden zu haben - ohne den Bruch hätte ich wohl nicht Zeit und Konzentration gefunden, die Dissertation zeitnah und in dieser Form zum Abschluss zu bringen.

Eidesstattliche Erklärungen

Hiermit erkläre ich, Florian Pillar, geb. am 02.11.1984 in Haan, an Eides statt, dass ich

- die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst,*
- keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen genutzt sowie*
- alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.*

Darüber hinaus erkläre ich im Sinne der guten wissenschaftlichen Praxis, keine manipulativen Veränderungen an den verwendeten Untersuchungsergebnissen über die angeführten Vereinfachungen zur Darstellung hinaus vorgenommen zu haben.

Wuppertal, im September 2014



Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt das Konzept der "Wuppertaler Expositions-Abschätzung" (WEA) als Gesamtverfahren zur Beurteilung inhalativer Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen vor. Das Konzept kombiniert das Brandschutzingenieurmodell "Fire Dynamics Simulator" (FDS) als Ausbreitungsrechnung methodisch mit Ansätzen des Arbeitsschutzes. Die Berücksichtigung des Ausbreitungsmodells beruht auf der differenzierten Analyse und Bewertung der Übertragungsmöglichkeit, welche sowohl die modellspezifischen Annahmen und Konzepte, aber auch wesentliche Rahmenbedingungen (u.a. gesetzliche Anforderungen, Umgebungsbedingungen, Arbeitsorganisation) einbindet. Die Übertragung und Ergänzung dient der Zielstellung, eine Möglichkeit zur rechnerischen Analyse und Bewertung stoffbezogener Tätigkeiten vorzulegen. Die WEA weist einen schrittweisen Aufbau auf. Dieser umfasst einzelne Module zur Informationsermittlung, Erfassung der Emission von Gefahrstoffen, Erfassung der Ausbreitung von Gasen sowie Bewertung der Tätigkeiten aufgrund der ermittelten ortsbezogenen Stoffkonzentrationen in der Arbeitsplatzluft. Neben dem Modell FDS im Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung untersetzen verschiedene bekannte Ansätze die übrigen Module, deren Verknüpfung über angepasste Schnittstellen eine geschlossene Gesamtanwendung ermöglicht. Die modularen Konkretisierungen umfassen z.B. das Arbeitssystem-Modell (Informationsermittlung), Verdunstungsmodelle (Erfassung der Stoffemission) oder den Bewertungsansatz in Anlehnung an die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 900 (Bewertung).

Neben der Konzeptentwicklung bildet die Validierung der WEA den zweiten methodischen Kernaspekt der Arbeit. Dazu werden für unterschiedliche Betrachtungsfälle erhobene Messdaten als Referenzwerte mit Berechnungsergebnissen übereinstimmender Rahmenbedingungen verglichen. Untersuchungsgegenstände der Validierungsarbeiten sind im Besonderen die Genauigkeit bzw. Verwendbarkeit des Ausbreitungsmodells, aber auch die Überprüfung der Modulschnittstellen und -verknüpfungen sowie die Verwendbarkeit des Gesamtverfahrens als geschlossene Anwendung.

Die Auswertung und Interpretation der Validierungsergebnisse belegen, dass das Modell FDS unter verschiedenen Anwendungsbedingungen (z.B. bekannte Emissions- und Lüftungsbedingungen bei flächiger Freisetzung) detaillierte und genaue Konzentrationsberechnungen der gasförmigen Stoffausbreitung ermöglicht. Die Untersuchungen weisen auch die formal korrekte Gestaltung der erforderlichen Schnittstellen nach. Da bei Einsatz von Verdunstungsmodellen zur Emissionsermittlung eine erhebliche Unterschätzung der gemessenen Stofffreisetzung auftritt, kann jedoch die validierte Verwendung sowohl der Verdunstungsmodelle als auch der geschlossenen, nur auf Berechnungen beruhenden Gesamtanwendung nicht belegt werden. Die Anpassung des entwickelten Konzepts stellt das Ergebnis der Arbeit dar: Der vorgeschlagene validierte Ansatz umfasst für Arbeitsschutz-Betrachtungen die Möglichkeit zur Konzentrationsberechnung auf Grundlage des Brandschutzingenieurmodells, die methodisch zu einem Gesamtablauf ergänzt ist. Neben verschiedenen Einsatzbedingungen wird auf Berechnungen zur Emissionsabschätzung verzichtet, die daher anderweitig (z.B. durch vorgelagerte Messungen oder Analogiebetrachtungen) erfolgen muss.

Abstract

The submitted approach introduces the concept “Wuppertaler Exposure Assessment” (WEA) as an integrated assessment tool for inhalative risks of occupational activities with hazardous substances. The concept combines the fire engineering model “Fire Dynamics Simulator” (FDS) with processes of occupational health and safety studies methodically. FDS is used to calculate the gaseous dispersion in air without fire scenario. The differenced analysis and evaluation of model-specified assumptions, calculation concepts and fundamental framework conditions (e.g. legislative, environmental and work organisational requirements) justifies the model transfer. The study focusses on deducing an opportunity for risk assessments of hazardous substances solely based on calculations.

The designed WEA has a stepwise structure and is divided in 4 conceptual modules to determine informations, to capture emission and dispersion of substances and to assess inhalative exposures of occupants with determined, local-dependent concentrations in workplace air. The Model FDS specifies the module to capture the dispersion. Several well-known models are used to concretise another modules (e.g. model of working system for information determination, evaporation models in captures of emission and the evaluation concept of “Technische Regel für Gefahrstoffe” (TRGS) 900 for exposure assessment). Conceptual interfaces between the modules resp. models generate an integrated and cohesived proceeding.

The approach deals with validation studies of the designed WEA in a second part. The validation compares measurement data of different scenarios as reference with results of separate modules and the integrated concept that are calculated with the same conditions resp. parameters. It determines especially the accuracy and applicability of FDS as a tool for calculations of gaseous dispersion in air. Furthermore the functionality of interfaces and the applicability of the WEA as cohesived proceeding are reviewed.

Interpretation of validation studies shows applicability of FDS for calculating the gaseous dispersion in air with some conditions: For example detailed results are possible for known emission rates of an areal source and known room ventilation. Further the formal functionality of interfaces is verified. However the results of proven evaporation models underestimate measured emission rates with large differences, so the application of this emission models and as a consequence of cohesived WEA-proceeding just with calculations is non-validated. Because of that the research finding is an adjusted form of the WEA: the validated concept for occupational health and safety studies uses the fire engineering model as an opportunity to calculate local- and time-dependent substanceous concentrations with defined rules for application. The methodical supplement waives the calculation of emission rates, which has to be estimated with other methods (e.g. with previous measurement or analogy formation).



Abkürzungsverzeichnis

- AEUV** Vertrag über die Arbeitsweise der europäischen Union
- AGW** Arbeitsplatzgrenzwert
- ArbSchG** Arbeitsschutzgesetz
- ASiG** Arbeitssicherheitsgesetz
- ASR** Technische Regeln für Arbeitsstätten
- BauPG** Bauproduktengesetz
- BGW** Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege
- CEM** Complete Evaporation Model
- CFAST** Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
- CFD** Computational Fluid Dynamics
- CLP** Regulation on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures
- ChemG** Chemikaliengesetz
- CO** Kohlenstoffmonoxid
- D** Bundesrepublik Deutschland
- DGUV** Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
- DMEL** Derived Minimal Effect Level
- DIN** Deutsches Institut für Normung e.V.
- DNEL** Derived No Effect Level
- ECHA** European Chemicals Agency (Europäische Chemikalienagentur)
- EG** Europäische Gemeinschaft
- EGV** Vertrag über die europäische Union (Vertrag von Maastricht)
- EU** Europäische Union
- EUV** EU-Vertrag als zuletzt erfolgte Änderung des EGV
- EWG-Vertrag** Vertrag zur Gründung der europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
- FDS** Fire Dynamics Simulator

FID Flammenionisationsdetektor
GefStoffV Gefahrstoffverordnung
GHS Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals
IPA Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung
KMU Kleine und mittlere Unternehmen
LES Large-Eddy-Simulation
MBauVorIV Muster-Bauvorlagenverordnung
MBO Muster-Bauordnung
MIndBauRL Muster-Industriebaurichtlinie
MSBauVO Muster-Sonderbau-Verordnungen
NIST National Institute of Standards and Technologie, USA
PNEC Predicted No Effect Concentration
ppm Parts per Million, Konzentrationsangabe mit Bezug auf Stoffmengen
REACH Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals
SVP Saturation Vapour Pressure Model
TRGS Technische Regeln für Gefahrstoffe
UN Vereinte Nationen
WEA Wuppertaler Expositions-Abschätzung

Kapitel 1

Einleitung und Zielstellung

Im Rahmen betrieblicher Tätigkeiten verwenden Beschäftigte zahlreiche Gefahrstoffe¹, die zur Herstellung, Weiterverarbeitung oder Anwendung unterschiedlicher Produkte erforderlich sind. Aus diesem Umgang mit Gefahrstoffen ergeben sich oftmals Belastungen und Gefährdungen² der Gesundheit der Beschäftigten. Im Sinne des Arbeitsschutzes ist daher eine stoffspezifische Betrachtung durch eine Gefährdungsbeurteilung erforderlich, die potentielle Gefährdungen ermittelt und bewertet sowie als Ergebnis notwendige Schutzmaßnahmen ausweist.

Die Gefährdungsbeurteilung, die sowohl im Planungsstadium als auch für bestehende Arbeitsplätze erfolgen muss, dient der umfassenden Untersuchung potentieller Auswirkungen, die durch den Umgang der Beschäftigten mit Gefahrstoffen hervorgerufen werden können. Zur Durchführung sind angemessene methodische Konzepte und Verfahren erforderlich, welche spezifische Eigenheiten der Gefährdungen durch Gefahrstoffe erfassen und berücksichtigen.

1.1 Problemstellung und Motivation

Ziel des Arbeitsschutzes ist die Feststellung und angemessene Beherrschung von Gefährdungen, die aus dem betrieblichen Umfeld (Arbeitsgegenstand, Arbeitsmittel, Umgebungsbedingungen etc.) auf Beschäftigte einwirken können. Die Beurteilung, ob im Zuge der betrieblichen Tätigkeiten eine tatsächliche Gefährdung vorliegt, erfolgt gemäß dem allgemeinen Gefährdungsmodell unter Berücksichtigung der Aspekte des sog. "Hazard"³ sowie der sog. "Exposition"⁴. Das Zusammenwirken beider Faktoren ist in Abb. 1.1 abstrahiert dargestellt.

Für Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen wird der Aspekt "Hazard" durch Stoffeigenschaften (bspw. Temperatur, Einstufung als leicht entzündbar, Einstufung als giftig bei Einatmen, Einstufung als kanzerogen etc.) charakterisiert, die akute oder chronische Gesundheitsschäden hervorrufen können. Die Parameter zu "Exposition" werden durch die Rahmenbedingungen der entsprechenden Tätigkeit (z.B. Art des Verfahrens, Aufenthaltsdauer von Personen, Verarbeitungstemperaturen etc.) sowie die Arbeitsorganisation, welche maßgeblich die stoffliche Einwirkungsdauer auf Beschäftigte beschreibt, gebildet. Diese münden in Angaben zur stofflichen Konzentration in der Luft am Arbeitsplatz, die über unterschiedliche Zeitspannen wirken.

Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung müssen beide Gefährdungsaspekte samt ihrer charakterisierenden Parameter berücksichtigt werden, um möglichst präzise Aussagen zum erforderli-

¹ Stoffe, die aufgrund ihrer Eigenschaften oder Verwendung zu Gefährdungen von Beschäftigten führen können, vgl. auch [1].

² "Möglichkeit eines Schadens ohne bestimmte Anforderungen an deren Ausmaß oder Eintrittswahrscheinlichkeit" [2].

³ Engl. Gefahr, Gefährdung, Risiko; Grundlegende Gefährlichkeit eines Arbeitsmittels etc., die sich aus den inhärenten Eigenschaften (z.B. Emission von Lärm) ergibt.

⁴ Berücksichtigung der tätigkeitsspezifischen und arbeitsorganisatorischen Bedingungen, die ein zeitliches Aufeinandertreffen des Hazard mit Beschäftigten ergeben.



Abbildung 1.1: Beispiele stoffspezifischer Aspekte des Gefährdungsmodells [3, 4]

chen Maßnahmeniveau treffen zu können. Eine stoffbezogene Gefährdungsbeurteilung muss daher die aus der Tätigkeit resultierende Exposition - zusammengefasst in der zeitlichen Entwicklung der Luftkonzentration - mit den gefährlichen Stoffeigenschaften in Verbindung bringen und bewerten. Dies erfordert einerseits die Feststellung von konkreten Stoffeigenschaften, bei der oftmals auf bereits durchgeführte Untersuchungen zur Stoffforschung zurückgegriffen werden kann; Stoffeigenschaften sind in der Regel bekannt und geeignet dokumentiert⁵. Demgegenüber müssen Angaben zur ortsabhängig wirksamen Konzentration unter Beachtung mehrerer voneinander abhängiger Teilschritte (Stoffemission⁶, -ausbreitung⁷ und -immission⁸ [6]) ermittelt werden, die sich fortschreitend aufeinander auswirken und die Belastung von Beschäftigten beeinflussen. Die grundlegenden Vorgänge, die in ihrer Gesamtheit zu stoffspezifischen Wirkungen auf Beschäftigte führen, sowie die aufeinanderfolgende Einflussnahme dieser Aspekte sind in Abb. 1.2 im Überblick dargestellt.

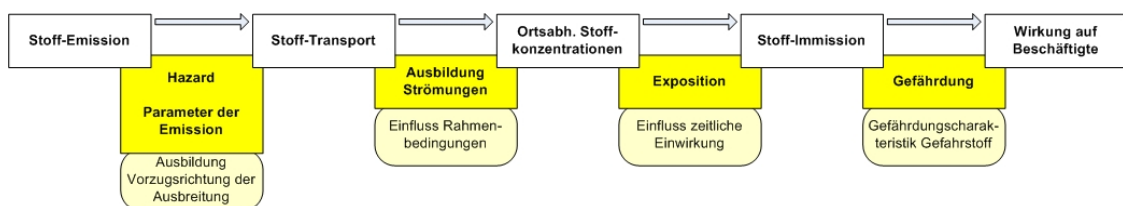


Abbildung 1.2: Überblick der Ablauffolge stoffspezifischer Wirkungsvorgänge [7]

Die vollständige Untersuchung einer Tätigkeit im Hinblick auf Gefährdungen durch Gefahrstoffe macht geeignete Methoden erforderlich, welche die Aspekte "Hazard" und "Exposition" be-

⁵ Stoffeigenschaften werden in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen benötigt und sind entsprechend verfügbar, z.B. in Literatur zur Chemie (siehe bspw. [5]).

⁶ Freisetzung eines Gefahrstoffes in die räumliche Umgebungsluft.

⁷ Verbreitung in der Raumluft und Bildung ortsabhängiger Konzentrationen, auch als Transmission bezeichnet.

⁸ Ablagerung und Aufnahme eines Stoffes in Organismen.

rücksichtigen und verknüpfen. Zur Ermittlung von Stoffkonzentrationen stehen Messverfahren, Analogiebetrachtungen zu vergleichbaren Arbeitsplätzen sowie rechnerische Modelle⁹ zur Verfügung. Messungen zur Ermittlung von Stoffkonzentrationen, gerade in Verbindung mit einer zeitlichen Erfassung, sind oftmals mit erheblichem messtechnischen und finanziellen Aufwand verbunden. Darüber hinaus bedarf eine Messung realistischer Arbeitsbedingungen, so dass kein unmittelbarer Einsatz im Rahmen von Planungsprozessen stattfinden kann. Ebenso basieren Analogiebetrachtungen auf Ergebnissen von Gefährdungsbeurteilungen von Arbeitsplätzen mit vergleichbaren Bedingungen. Demgegenüber sind rechnerische Verfahren in der Lage, bereits im Vorfeld zur Errichtung von Arbeitsplätzen Aussagen zu treffen, die auf gedanklicher Modellbildung beruhen. I.A. stehen die Berechnungsergebnisse in maßgeblicher Abhängigkeit zur grundlegenden Modellkonzeption und Genauigkeit der Eingangsbedingungen.

Im Kontext des Arbeitsschutzes existieren verschiedene rechnerische Modellkonzepte, die der Ermittlung von tätigkeitsbezogenen Luftkonzentrationen dienen. Sollen diese im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung zum Einsatz kommen, so müssen sie in der Lage sein, realitätsnahe Ergebnisse im Hinblick auf die Belastung von Beschäftigten durch Gefahrstoffe zu erbringen. Es ist daher erforderlich, dass die entsprechenden Modelle für den jeweiligen Anwendungsfall validiert¹⁰ sind, um von Ergebnissen Rückschlüsse auf die real auftretenden Verhaltensweisen ziehen zu können. Weiterhin müssen Verfahren Anwendung finden, die aufgrund der Komplexität der erforderlichen Eingangsparameter diese in angemessener Detaillierung und Genauigkeit aufgreifen, miteinander verknüpfen und letztendlich ein Ergebnis bezüglich der tatsächlichen Gefährdung von Beschäftigten ableiten.

Vor dem Hintergrund aktuell verfügbarer, auf den Betrachtungsgegenstand der Gefahrstoffe angepasster Modelle, die teilweise als Handrechenverfahren, teilweise als komplexe Lösungsstrategien im Rahmen computerbasierter Verfahren vorliegen (siehe z.B. [9]), besteht jedoch das Problem, dass diese i. A. über keine Validierung verfügen [10]. Zudem beziehen diese Konzepte die zur vollständigen Expositionsbeschreibung erforderlichen tätigkeits- und stoffspezifischen Parameter (z.B. Dauer der Stofffreisetzung oder des Aufenthalts von Beschäftigten) nicht oder nur bedingt ein, so dass lediglich von singulären Modellen¹¹ ausgegangen werden kann.

Analog zum Betrachtungsgegenstand des Arbeitsschutzes, der sich mit der zeitlichen Ausbreitung und der Entwicklung ortsabhängiger Konzentrationen von Stoffen mit gefährlichen Eigenschaften in der Luft am Arbeitsplatz befasst, bestehen im Rahmen der sicherheitstechnischen Disziplin des Brandschutzes vergleichbare Interessen. Brandschutztechnische Untersuchungen befassen sich mit der Personensicherheit im Brandfall, wobei u.a. die Ausbreitung von Brandrauch und beinhaltenen Verbrennungsprodukte von Bedeutung ist. An dieser Stelle ergeben sich ebenso Gefährdungen, die aus den Stoffeigenschaften in Verbindung mit der Konzentration sowie der Dauer der Belastung von Personen resultieren (vgl. Gefährdungsmodell, S. 2). Während im Arbeitsschutz die langfristige Beherrschung von Gefährdungen zur Vermeidung chronischer Schädigungen im Fokus steht, sind Maßnahmen des Brandschutzes auf den akuten Personenschutz im Brandfall ausgerichtet.

Im Rahmen des Brandschutzingenieurwesens, das sich maßgeblich mit der Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Gewährleistung des Personenschutzes im Brandfall befasst, kommen ebenfalls

⁹ Abbildungen der Wirklichkeit, die unter Berücksichtigung von Vereinfachungen anhand von mathematischen Ansätzen unterschiedliche Größen bestimmen können.

¹⁰ Validierung bezeichnet den Nachweis der Richtigkeit bzw. Genauigkeit der Ergebnisse rechnerischer Verfahren anhand von empirischen Vergleichen von Versuchsrechnungen und Daten der Realität [8].

¹¹ Modelle, die lediglich auf einzelne Fragestellungen anwendbar sind und kein ganzheitliches Gesamtverfahren darstellen.

rechnerische Verfahren zum Einsatz. Diese Brandschutzingenieurmodelle¹² sind auf die Abschätzung der zeitabhängigen Ausbreitung von Feuer und Rauch im Brandfall konzentriert, wobei über Teilkonzepte eine Erfassung der ortsabhängigen Konzentrationen der im Brandrauch enthaltenen Komponenten (Verbrennungsprodukte, brennbare Stoffe und - im Wesentlichen - eingemischte Umgebungsluft) ermöglicht wird. I.A. gliedern sich die Brandschutzingenieurmodelle zur Berechnung der Rauchausbreitung konzeptionell in sog. Feldmodelle, Zonenmodelle und Handrechenverfahren (vgl. Abb. 1.3). Den Feldmodellen liegen dabei die allgemeinen Prinzipien der numerischen Strömungsmechanik (Computational Fluid Dynamics - CFD) zugrunde, deren Annahmen (z.B. geringe Strömungsgeschwindigkeiten¹³ oder Berechnungssystematik lokaler Turbulenzen, vgl. [11, 12]) die Betrachtungen auf Brandfälle anpassen.

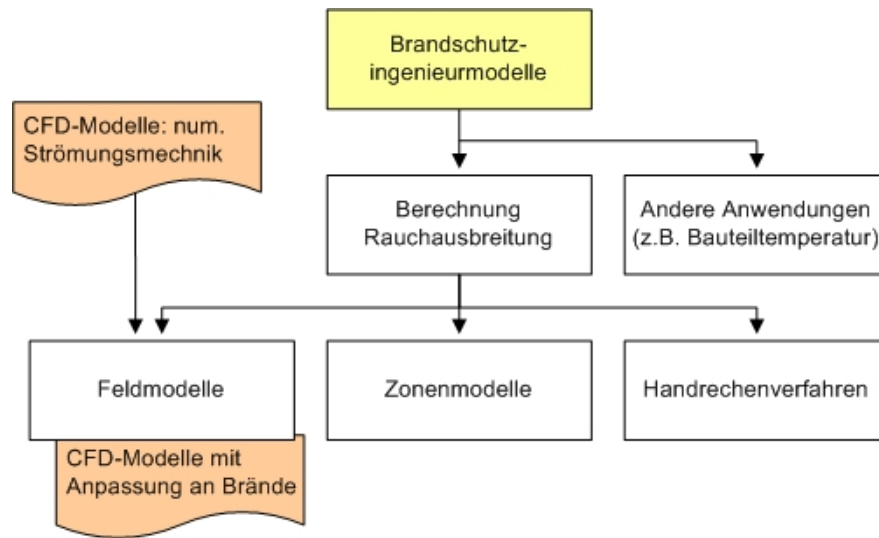


Abbildung 1.3: Überblick der Konzepte von Brandschutzingenieurmodellen [7]

Gegenüber den bestehenden Modellen des Arbeitsschutzes verfügen relevante Brandschutzingenieurmodelle über teils umfangreiche Untersuchungen zur Validierung der eingesetzten Teilmodelle, so dass unter Beachtung der jeweiligen Modellkonzeption gute Übereinstimmungen der Ergebnisse mit der Realität bestehen. Da bereits im Vorfeld die theoretische Anwendbarkeit eines Feldmodells, das entsprechende Validierungsstudien vorweist, auf eine Nutzung im Arbeitsschutz hin überprüft wurde [13], weist dieses durchaus bei entsprechenden Anpassungen die Möglichkeit einer synergetischen Anwendung auf.

Zusammenfassend bestehen sowohl im Rahmen von Betrachtungen des Arbeitsschutzes als auch des Brandschutzes Interessen, die zeitabhängige Ausbildung von Konzentrationen unterschiedlicher Stoffe in der Luft zu untersuchen und zu bewerten. Da das Brandschutzingenieurwesen bereits über rechnerische Modelle und Konzepte zur Bewältigung dieser Aufgabenstellung verfügt, die entsprechend validiert sind, besteht die Motivation, diese auf die Möglichkeit zur Anwendung im Sinne des Arbeitsschutzes hin zu untersuchen. Dabei besteht insbesondere das Interesse, Verknüpfungspunkte zur Nutzung interdisziplinärer Synergieeffekte aufzuzeigen sowie durch Erweiterungen eine ganzheitliche Betrachtung von Gefährdungen für Beschäftigte aus dem Umgang mit Gefahrstoffen zu ermöglichen. Gleichermäßen wird das Motiv verfolgt, ein methodisches Vorgehen zur Ermittlung von Gefährdungen durch Gefahrstoffe zu ermöglichen, das

¹² In der vorliegenden Arbeit (Strömungs-) Modelle zur Berechnung der Rauchausbreitung, die auf die spezifischen Randparameter eines Brandes angepasst sind. Davon ab existieren auch Modelle mit anderem Fokus, z.B. zur Ermittlung von Bauteiltemperaturen.

¹³ Low-MACH-Bereich: MACH-Zahl M (Relation lokaler Strömungsgeschwindigkeiten zur Schallgeschwindigkeit) kleiner als $0,3 M$.

- durch Validierungsuntersuchungen nachgewiesen - zu möglichst realitätsnahen Ergebnissen kommt.

1.2 Zielstellung, Hypothesen und methodisches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, die Eignung von Brandschutzingenieurmodellen zur Anwendung in Arbeitsschutz-Betrachtungen zu überprüfen, Modelle methodisch zu übertragen und diese in ein rechnerisches Gesamtverfahren zur Gefährdungsbeurteilung zu implementieren. Das Gesamtverfahren soll entsprechend der Methodik des Arbeitsschutzes die stoffbezogene Analyse und Bewertung konkreter Arbeitsbedingungen ermöglichen. Dabei ist die Schaffung struktureller Verknüpfungen zwischen Brandschutzingenieur- und Arbeitsschutzmethoden und -modellen beabsichtigt, um eine geschlossene Anwendung zur prospektiven, auf rechnerischen Betrachtungen beruhenden Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen in Arbeitsräumen vorzulegen. In diesem Rahmen sollen die objekt-, tätigkeits- und stoffspezifischen Parameter entsprechend ihrer Relevanz in geeigneten Teil-Modellen Verwendung finden. Hierbei bleibt der Anwendungsbereich des Gesamtverfahrens

- auf Stoffe im Normaltemperaturbereich¹⁴,
- auf die luftgebundene Ausbreitung gasförmiger Stoffe, die durch verschiedene Vorgänge emittiert werden können, sowie
- auf die Bewertung inhalativer, chemisch-toxischer Gefährdungen

beschränkt. Neben der Erarbeitung des Gesamtkonzepts bildet dessen Validierung den zweiten Schwerpunkt der Arbeit, der auf Grundlage experimenteller Daten die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse untersucht und der Feststellung der praxismässigen Anwendbarkeit bzw. von Anwendungsgrenzen dient.

Die Betrachtungen und Denkansätze dieser Arbeit, die auf die Erarbeitung und Anwendbarkeit des Gesamtverfahrens abzielen, orientieren sich methodisch an zuvor definierten Hypothesen. Diese methodischen Annahmen legen Schwerpunkte der Untersuchungen fest, die zur Erreichung des geplanten Vorhabens wichtige Rahmenanforderungen beschreiben. Die somit geschaffenen Bezugspunkte dienen während der Bearbeitung der Aufgabenstellung der Identifizierung relevanter Aspekte und der abschließenden Ergebnisdarstellung. Die Hypothesen dieser Arbeit lauten:

1. *Brandschutzingenieurmodelle, insbesondere CFD-Modelle, sind in der Lage, Aussagen über das räumliche, zeitabhängige Ausbreitungsverhalten von Gefahrstoffen in Arbeitsräumen zu treffen. Wesentliche Voraussetzung bildet die Verwendung stoffspezifischer Parameter in der grundlegenden Modellkonzeption. Eine Nutzung von Synergieeffekten unter Beachtung erforderlicher Anpassungen ist somit möglich.*
2. *Betrachtungen des Arbeits- und Brandschutzes unterscheiden sich u.a. durch gesetzliche Anforderungen, anzutreffende Umgebungsbedingungen und erforderliche Bewertungsschritte. Die Nutzung von Brandschutzingenieurmodellen zur stoffspezifischen Ausbreitungsberechnung im Arbeitsschutz erfordert daher die Verknüpfung mit weiteren Modellen, um alle Vorgänge der Stoffemission und -ausbreitung sowie die stoffliche Exposition von Beschäftigten darzustellen und zu bewerten. Aussagen über Gefährdungen für Beschäftigte ermöglicht ein daraus resultierendes Gesamtverfahren.*

¹⁴ Eigentemperatur der betrachteten Stoffe liegt im Bereich normaler Umgebungstemperaturen.

3. *Das zu entwickelnde Gesamtverfahren besitzt sowohl für die Berechnung der Stoffausbreitung als auch für die geschlossene Gesamtanwendung Validität. Der entsprechende Nachweis lässt die Ableitung von Anwendungsbedingungen und Einsatzmöglichkeiten zur Verwendung im Sinne der GefStoffV zu.*

Zur Veri- oder Falsifizierung der Hypothesen bedient sich die vorliegende Arbeit einer Vielzahl methodischer Schritte. Abb. 1.4 fasst diese zusammen: Zu Beginn werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die eine Nutzung rechnerischer Verfahren in Arbeits- und Brandschutz ermöglichen, aufgezeigt sowie rechtliche Anforderungen (z.B. Schutzzielkonkretisierungen) erarbeitet. Im Anschluss werden potentiell nutzbare Methoden und Modelle des Arbeitsschutzes und Brandschutzingenieurwesens, die einzelne Teilbereiche der für den Anwendungsfall notwendigen Untersuchungen darstellen, eruiert und erfasst¹⁵. Darüber hinaus erfordert die spätere Konzeption des Gesamtverfahrens die Feststellung sämtlicher objekt-, tätigkeits- und stoffspezifischer Parameter, welche die Exposition von Beschäftigten beeinflussen. Diese relevanten Parameter dienen im weiteren Verlauf als Anforderungen, deren Einfluss in stoffspezifischen Betrachtungen zu berücksichtigen ist und die entsprechend konzeptionell umgesetzt werden müssen. Auf den Anforderungen aufbauend erfolgt die Analyse der zuvor erfassten Modelle im Hinblick auf ihre ursprünglichen Zielsetzungen und generellen (möglichst validierten) Anwendungsgrenzen. Die darauf folgende Bewertung dient der grundlegenden Identifizierung von für das geplante Gesamtverfahren potentiell geeigneten Modellen.

Der Vergleich dieser aus den verschiedenen sicherheitstechnischen Disziplinen stammenden Modelle mit den zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen des Arbeitsschutzes dient der Auswahl der tatsächlich zu implementierenden Ansätze. Sofern erforderlich werden auf der Grundlage der vorherigen Modellbeschreibungen konzeptionelle Gestaltungsmaßnahmen durchgeführt, die sowohl der ggf. notwendigen Anpassung der zugrunde gelegten Konzepte als auch der methodischen Zusammenführung sowie Verknüpfung der einzelnen Methoden und Modelle zu einem Gesamtverfahren dienen.

Als Abschluss der Arbeit erfolgt die für den praktischen Einsatz notwendige Validierung anhand verschiedener Fallbetrachtungen, die als Ergebnis Anwendungs- und Genauigkeitsgrenzen benennt. Die Bewertung der Voraussetzungen eines praktischen Einsatzes im Sinne einer Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen zielt auf die Benennung von Anwendungsmöglichkeiten und Ansätzen weiterer Forschungsmöglichkeiten ab.

¹⁵ Die Erläuterung der verschiedenen Modelle erfolgt in einer eigenständigen Veröffentlichung, vgl. [14, 15].

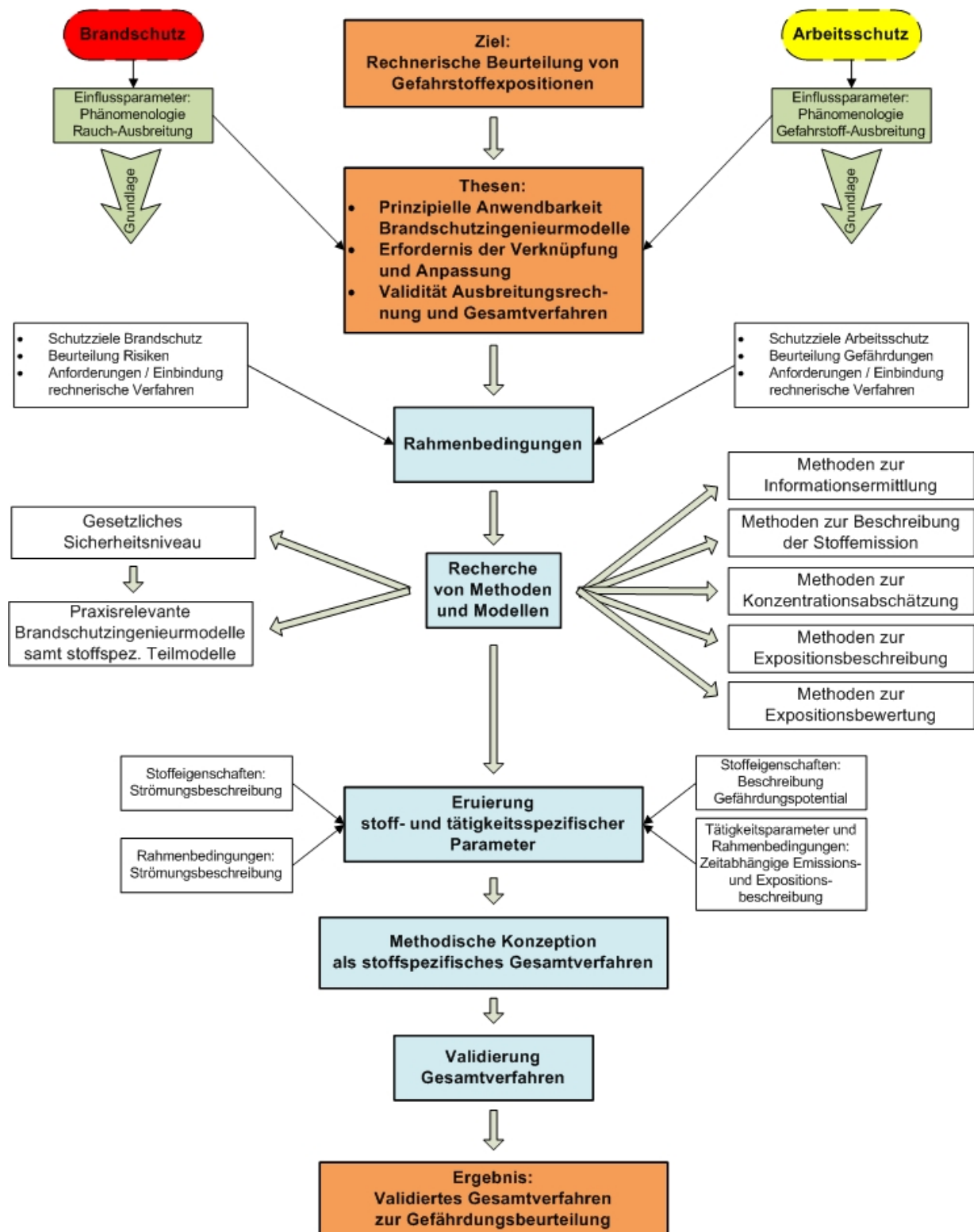


Abbildung 1.4: Überblick der methodischen Vorgehensweise [7]

Kapitel 2

Rechtliche Rahmenbedingungen und Schutzzielkonzepte

Die Betrachtungsgegenstände des Arbeitsschutzes sowie des Brandschutzes beruhen auf unterschiedlichen gesetzlichen Grundlagen. Diese beinhalten gleichermaßen die zentrale Anforderung des Personenschutzes, der durch Schutzzielkonzepte konkretisiert wird. Die Zielstellungen weichen jedoch voneinander ab. Die Methoden und Modelle der einzelnen Disziplinen beruhen u.a. auf den differierenden Konzeptionen der grundlegenden Regelwerke, die unmittelbaren Einfluss auf die Beurteilung von Situationen (betriebliche Tätigkeiten bzw. Ausbreitung von Feuer und Rauch im Brandfall) haben.

Für die Betrachtungen ist es daher zunächst erforderlich, die gesetzlichen Rahmenbedingungen des Arbeitsschutzes und des Brandschutzes darzustellen sowie die Anforderungen¹⁶ an numerische Verfahren herauszuarbeiten. Darüber hinaus müssen die zugrunde liegenden Untersuchungsziele verglichen werden, um sowohl Unterschiede in den Zielrichtungen der einzelnen Modelle fest- als auch bereits Ansatzpunkte zur Anpassung und Verknüpfung einzelner, interdisziplinärer Methoden herauszustellen.

2.1 Produktsicherheit und Arbeitsschutz: Gesetzliche Grundlagen und Schutzzielkonzept

Die Aspekte des Schutzes von Beschäftigten, die im Rahmen ihrer betrieblichen Tätigkeiten mit Arbeitsmitteln und -stoffen unterschiedlichen Gefährdungen ausgesetzt sein können, erfasst das nationale Rechtsgefüge der Bundesrepublik Deutschland (D) in verschiedenen Regelungsgegenständen. Auf Grundlage des "Vertrag über die Arbeitsweise der europäischen Union" (AEUV) [16], der neben dem "Vertrag über die europäische Union" (sog. Vertrag von Maastricht, EG) [17] samt Änderungsverträgen das Ziel der Angleichung der einzelnen nationalen Rechtssetzungen der Mitgliedsstaaten verfolgt, werden die sog. Rechtsbereiche der Produktsicherheit (erfasst durch Art. 114 AEUV¹⁷ [16]) sowie der Arbeitssicherheit (begründet in Art. 153 AEUV¹⁸ [16]) unterschieden.

¹⁶ Bspw. gesetzlicher, betrieblicher oder wissenschaftlicher Natur.

¹⁷ Schaffung einheitlicher Vorschriften des europäischen Binnenmarktes für das Inverkehrbringen von Produkten durch Harmonisierung technischer Vorschriften und Normen, die durch die Gesetzgebung der Mitgliedsstaaten inhaltlich übernommen werden müssen.

¹⁸ Erhöhung von Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit durch Schaffung von europäischen Mindestanforderungen, deren Schutzniveau im Zuge der nationalen Gesetzgebung individuell gesteigert werden kann.

2.1.1 Europäische und nationale Rechtssystematik

Im Rahmen der kooperativen, abgestimmten Vorgehensweisen europäischer Staaten und des Ausbaus der Europäischen Gemeinschaft (EG) wurde mit Hilfe des EGV sowie der angeschlossenen Änderungsverträge (zuletzt sog. EU-Vertrag, EUV [18]) eine Rechtssetzung installiert, die Bestimmungen zu Grundsätzen und gemeinsamen politischen Ansätzen der europäischen Union (EU) festlegt. Ergänzend dazu vereinbarten die Mitgliedsstaaten im AEUV, der auf gleicher rechtlicher Ebene steht, Regelungen zur Funktionsweise der EU. Diese befassen sich u.a. mit der Regulierung gemeinsamer europäischer Interessen, die gleichsam vorliegen und in allen Mitgliedsstaaten gelten. Auf Grundlage dieser zentralen Vertragswerke beruhen weitere europäische Rechtsakte, die unterschiedliche Zielsetzungen im Rahmen der Rechtssetzung und nationalen Umsetzung von Konkretisierungen des EUV bzw. AEUV haben. Im Einzelnen sind dies u.a.:

- EG-Verordnungen,
- EG-Richtlinien und
- EG-Empfehlungen.

Die Rechtsinstrumente dienen prinzipiell der Festlegung harmonisierter Regelungen sowie deren Einordnung in die gemeinschaftliche und nationale Gesetzgebung. Dabei haben die beiden wesentlichen Instrumente, die EG-Verordnungen und die EG-Richtlinien, verschiedene Verbindlichkeiten. Im Sinne der Differenzierung von Produkt- und Arbeitssicherheit gemäß AEUV [16] erfolgt eine unterschiedliche Verwendung:

EG-Verordnungen besitzen für den gesamten Bereich der EU unmittelbare Wirksamkeit und sind rechtsverbindlich, eine separate Umsetzung in die nationale Gesetzgebung ist somit nicht erforderlich. Dieses Instrument findet im Rahmen des Regelungsgegenstandes der Produktsicherheit Verwendung, u.a. harmonisierte Normen dienen der Konkretisierung. EG-Richtlinien sind dagegen lediglich im Hinblick auf die beabsichtigte Zielstellung verbindlich, die eine separate Umsetzung in nationales Recht erforderlich macht. Für den Regelungsgegenstand der Produktsicherheit muss dies ohne Veränderung geschehen, im Bereich der Arbeitssicherheit kann eine staatspezifische, über die europäisch definierten Mindestanforderungen hinausgehende Verschärfung der Regelungen erfolgen. Ergänzend veröffentlicht die EU-Kommission zum Zweck weiterer Erläuterungen und Konkretisierung ggf. EG-Empfehlungen sowie sog. Guidelines. Ergänzende Anforderungen legt bspw. die europäisch-harmonisierte Normung fest.

Zur Anpassung der nationalen Gesetzgebung an die europäische Rechtssetzung als auch zur Reglementierung gemeinschaftlich nicht betrachteter Bereiche verfügt der Gesetzgeber in Deutschland über die Rechtsinstrumente der

- Gesetze und
- Verordnungen.

Diese Einteilung bildet verschiedene Ebenen der Rechtssetzung aus, die aufeinander aufbauen und der fortführenden Konkretisierung dienen. Während Gesetze als Grundlage aller weiteren Ebenen durch die sog. Legislative¹⁹ verabschiedet werden und den Zweck globaler, grundlegender Regelungen verfolgen, können angeschlossene Verordnungen durch die zuständigen Minis-

¹⁹ Institutionen der Gesetzgebung, z.B. Bundestag und -rat.

terien²⁰ erlassen werden. Demnach beruhen Verordnungen immer auf einem übergeordneten Gesetz, auf dessen sog. Ermächtigungsgrundlage ein Erlass zur Konkretisierung des Inhalts oder zur Spezifizierung auf besonderen Teilgebieten möglich wird.

Über die Gesetzes- und Verordnungsebenen hinaus vollziehen verschiedene Anknüpfungen Konkretisierungen der gesetzlichen Anforderungen: Sog. untergesetzliche Regelwerke (z.B. Technische Regeln) beinhalten weitere Spezifikationen, die sich unmittelbar auf übergeordnete Verordnungen beziehen und durch Ausschüsse der zuständigen Ministerien erarbeitet werden. Für die Erarbeitung der untergesetzlichen Regelwerke bedarf es somit ebenfalls einer entsprechenden Ermächtigungsgrundlage. Weiterhin können Präzisierungen durch Regelungen und Anforderungen erfolgen, die durch verschiedene - teils privatwirtschaftliche Institutionen (z.B. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V., Unfallversicherungsträger etc.) - erarbeitet und veröffentlicht werden. Diese besitzen in eingeschränktem Maße Rechtsverbindlichkeit (z.B. bei explizitem Verweis durch Gesetze und Verordnungen oder als Stand der Technik). Konkretisierungen von Gesetzen und Verordnungen für den Rechtsbereich der Produktsicherheit bilden vornehmlich technische Spezifikationen und Richtlinien (z.B. Normen), die sich vielfach auf Eigenschaften oder Konstruktion sicherer Produkte beziehen. Die Regelungsetzung im Regelungsgegenstand der Arbeitssicherheit verwendet neben Technischen Regeln u.a. branchenspezifische Hilfestellungen.

Das nationale föderalistische System unterscheidet Bereiche, in denen die Gesetzgebung bundeseinheitlich (z.B. Strafrecht) bzw. singulär in den Ländern unterschiedlich (z.B. Bildung) erfolgt (sog. Gesetzgebungskompetenzen). Die beschriebene Systematik der Rechtssetzung findet daher sowohl auf der Ebene des Bundes (z.B. Gesetzgebung durch Bundestag und -rat) als auch auf der Ebene der einzelnen Bundesländer (z.B. Gesetzgebung durch Landtag) Anwendung.

Bei gleichsamer Betrachtung der Systematiken und Zielstellungen der europäischen sowie der nationalen Rechtssetzung wird deutlich, dass zwischen beiden ein unabdingbarer Zusammenhang besteht: Die europäischen Rechtsinstrumente geben den Rahmen vor, indem europaweite, einheitliche Regelungen für notwendig erachtet werden. Diese werden entweder zur Harmonisierung unmittelbar geltend eingeführt (EG-Verordnungen) oder mit Zielsetzungen und ggf. Gestaltungsräumen an die Mitgliedsstaaten zur nationalen Umsetzung und Anpassung verwiesen (EG-Richtlinien). Wird eine Anpassung des national geltenden Rechts erforderlich, so geht der betrachtete Regelungsgegenstand in die nationale Rechtssystematik über, dessen Überführung und Konkretisierung die Gesetzes- und Verordnungsebene ausführen. Weitere Spezifikationen, z.B. über technische Regelwerke, können darauf aufbauend eingeführt werden. Der strukturelle Aufbau der verschiedenen Rechtsebenen ist in Abbildung 2.1 zusammengefasst.

2.1.2 Gefahrstoffe im Regelungsgegenstand der Produktsicherheit

Vor dem Hintergrund, Rahmenbedingungen eines einheitlichen europäischen Binnenmarktes zu schaffen und aufrecht zu erhalten, formuliert Art. 114 AEUV [16] als grundsätzliches Schutzziel inhärent sichere Produkte, dessen Einhaltung die Voraussetzung für das Inverkehrbringen darstellt. Die Vorschriften sowie die angeschlossenen Rechtsdokumente übertragen dem Hersteller (bzw. dem Importeur bei eingeführten Produkten) verschiedene Pflichten, die u.a. der Minimierung von Gefährdungen, die von Produkten ausgehen, dienen. Dieser Ansatz bezieht Produkte ein, für die spezifische europäische Regelwerke (z.B. sog. Maschinenrichtlinie [19]) gelten und die auf dem gemeinsamen Binnenmarkt inverkehrgebracht werden. Dabei verfolgen europäische Vorgaben das Ziel, harmonisierte Regelungen zur Gestaltung einheitlicher Rahmenbedingungen in allen Mitgliedsstaaten zu schaffen.

²⁰ Teilbereiche der sog. Exekutive.

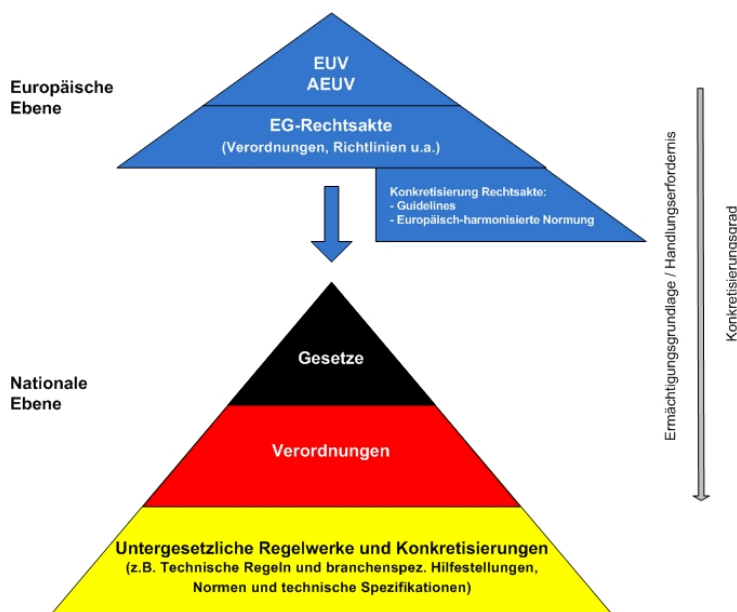


Abbildung 2.1: Aufbau der europäischen und nationalen Rechtssystematik [7]

Zur Erzielung eines gleich hohen Schutzniveaus stehen den zuständigen Organen der EU²¹ die zuvor aufgeführten Rechtsakte zur Verfügung. Bei der Schaffung eines harmonisierten Binnenmarktes wird eine grundsätzliche Umsetzungsstrategie verfolgt, die in der Vergangenheit verändert wurde: Anfänglich verfolgte die Bestrebung zur Schaffung einer gemeinsamen europäischen Rechtssetzung²² den Ansatz, die Einheitlichkeit produktspezifischer Anforderungen über möglichst konkrete Regelungen unmittelbar in den jeweiligen Richtlinien bzw. Verordnungen sicherzustellen (sog. Old Approach). Demgegenüber definieren nach 1985 erarbeitete harmonisierte Vorschriften vermehrt lediglich Ziele und Rahmenbedingungen, die durch weiterführende Dokumente (z.B. harmonisierte Normung) konkretisiert werden (sog. New Approach), um eine effizientere Arbeitsweise der an der Rechtssetzung beteiligten Instanzen zu ermöglichen. Diese Strategie, basierend auf Beschlüssen von EU-Kommission und -Rat eingeführt, wird nicht nur bei der Erarbeitung und Erweiterung neuer Vorschriften verwendet, gleichermaßen werden ältere Regelungen entsprechend angepasst (z.B. Überarbeitung Maschinenrichtlinie, vgl. [19]). Darüber hinaus wird zunehmend auf das Mittel der unmittelbar gültigen Verordnungen zurückgegriffen, um die Rechtssetzung vor dem Hintergrund der gestiegenen Anzahl der Mitgliedsstaaten der EU zu vereinfachen.

Aufgrund der harmonisierten Rechtssetzung sind Chemikalien, explizit Gefahrstoffe, als Produkte im Sinne der einheitlichen europäischen Produktsicherheit einzuordnen. Gefahrstoffe unterliegen somit verschiedenen Regelungen: Die wesentlichen Anforderungen an das Inverkehrbringen von Stoffen mit gefährlichen Eigenschaften definierten Regelungen der EG-Richtlinie 67/548/EWG [22] (sog. Stoffrichtlinie²³) im Sinne des Old Approach. Diese wurde unter den Gesichtspunkten des New Approach im Hinblick auf Zubereitungen mit gefährlichen Eigenschaften und Aufbau und Verfahrensweisen zum Sicherheitsdatenblatt durch die Richtlinien

²¹ An der Erarbeitung und Vereinbarung europäischer Richtlinien und Verordnungen wirken nach Initiative der EU-Kommission das EU-Parlament sowie der Rat der EU als Vertretung der Mitgliedsstaaten mit [20].

²² Eine harmonisierte Zusammenarbeit europäischer Staaten - insbesondere im Hinblick auf wirtschaftliche Interessen - erfolgte bereits seit 1957 auf Basis des Vertrags zur Gründung der europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG-Vertrag) [21].

²³ Regelungen für einzelne, potentiell gefährliche Stoffe.

99/45/EG [23] (sog. Zubereitungsrichtlinie²⁴) sowie 91/155/EWG [24] (Anforderungen zum Sicherheitsdatenblatt) ergänzt. Die Stoff- sowie die Zubereitungsrichtlinie legten Regelungen zum Inverkehrbringen, insbesondere zur Einstufung²⁵ und Kennzeichnung²⁶ von Stoffen und Gemischen, fest.

Die stoffspezifische Produktsicherheit wurde durch zwei grundlegende EG-Verordnungen novelliert, welche die vorherigen Richtlinien mit Übergangsfristen ablösen: Die Verordnung 1907/2006/EG (sog. REACH-Verordnung²⁷) [25] stellt dabei weitreichende Anforderungen an das Inverkehrbringen von Stoffen und Gemischen mit dem Ziel,

„(...) ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt sicherzustellen (...).“ [25]

Konkrete Regelungen stehen in Abhängigkeit zur inverkehrgebrachten Stoffmenge und dienen der Bewertung der Gefährdungspotentiale aller im Binnenmarkt verfügbaren Stoffe sowie der Kommunikation der Ergebnisse innerhalb der Lieferkette. Teil dieser Kommunikationsmittel sind bspw. ein neu gestaltetes Sicherheitsdatenblatt (Ersatz von 91/155/EWG), sog. Expositionsszenarien²⁸ der sicheren Verwendung sowie vom Hersteller zu erarbeitende Grenzwerte (DNEL²⁹, DMEL³⁰ und PNEC³¹). Erfüllt der Inverkehrbringer die Anforderungen nicht, besteht keine Möglichkeit zum Handel auf dem europäischen Markt. Eine Vielzahl von Leitfäden der für die Umsetzung zuständigen Institution ECHA³² konkretisieren die REACH-Verordnung im Sinne des New Approach (z.B. [28]).

Als weitere Grundlage regelt die Verordnung 1272/2008/EG Anforderungen und Kriterien der Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung neu (sog. CLP-Verordnung³³, [29]). Dabei werden die Regelungen, die international das sog. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) der Vereinten Nationen (UN) festlegt, für den europäischen Binnenmarkt umgesetzt. Im unmittelbaren Vergleich zu den Forderungen der Stoff- sowie Zubereitungsrichtlinien, die die CLP-Verordnung nach Ablauf der Übergangszeit vollständig ersetzt, werden u.a. Kriterien zur Einstufung von Stoffen und Gemischen sowie die Gefahrensymbole verändert, so dass es zu stoffspezifischen Veränderungen der Kategorisierung kommen kann. Die Verordnung 1272/2008/EG verfügt über verschiedene, umfangreiche Anhänge zur Erläuterung der Anforderungen. Vor dem Hintergrund des New Approach besteht dagegen lediglich eine geringe Anzahl konkretisierender Dokumente (bspw. [30]), da die internationalen Ansätze Detailregelungen unmittelbar im Verordnungstext schaffen.

Trotz der formal in verschiedenen Richtlinien bzw. Verordnungen gestellten Forderungen zum Inverkehrbringen sowie zur Einstufung und Kennzeichnung von Gefahrstoffen stehen diese in unmittelbarem Zusammenhang. Die Schnittstelle bildet u.a. das Kommunikationsinstrument des

²⁴ Regelungen für Gemische potentiell gefährlicher Stoffe.

²⁵ Kategorisierung der Gefährlichkeit anhand verschiedener Stoffmerkmale als Hazard-Aspekt, vgl. Gefährdungsmodell S. 2.

²⁶ Gefahrenhinweise auf Gebinden und Verpackungen mit Hilfe von Gefahrensymbolen und standardisierten Hinweistexten.

²⁷ REACH stellt die Abkürzung für Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals (Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien) dar.

²⁸ Verwendungsbedingungen, die u.a. der Inverkehrbringer den nachgeschalteten Anwendern, z.B. in Form spezifischer Verfahren oder Verwendungen, zur Beherrschung der Exposition empfiehlt [25, 26].

²⁹ Der "Derived No Effect Level" stellt die aus Versuchs- und Beobachtungsdaten abgeleitete Expositionshöhe dar, unterhalb der die menschliche Gesundheit nicht geschädigt wird (vgl. [27]).

³⁰ Der "Derived Minimal Effect Level" stellt die Expositionshöhe dar, unterhalb der für Stoffe ohne Wirkschwelle (z.B. kanzerogene Stoffe) gesellschaftlich akzeptierte Gesundheitsschäden eintreten können (vgl. [27]).

³¹ Die "Predicted No Effect Concentration" stellt den Grenzwert dar, unterhalb dessen negative Effekte für die Umwelt und die enthaltenen Ökosysteme nicht zu erwarten sind (vgl. [27]).

³² European Chemicals Agency, engl.: Europäische Chemikalienagentur.

³³ Regulation on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures, engl.: Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen.

Sicherheitsdatenblattes, das zum Inverkehrbringen von Gefahrstoffen zwingend erforderlich ist. Wesentlicher Bestandteil dessen ist die Einstufung und Kennzeichnung des jeweiligen Stoffes, die gemäß der Stoff- oder Zubereitungsrichtlinie³⁴ bzw. anhand der Bestimmungen der CLP-Verordnung erfolgen. Die entsprechenden Datensätze werden gleichsam in einer Datenbank durch die ECHA gespeichert und vorgehalten³⁵. Die Struktur der Gesetzgebung zur stoffspezifischen Produktsicherheit ist auszugsweise in Abb. 2.2 dargestellt.

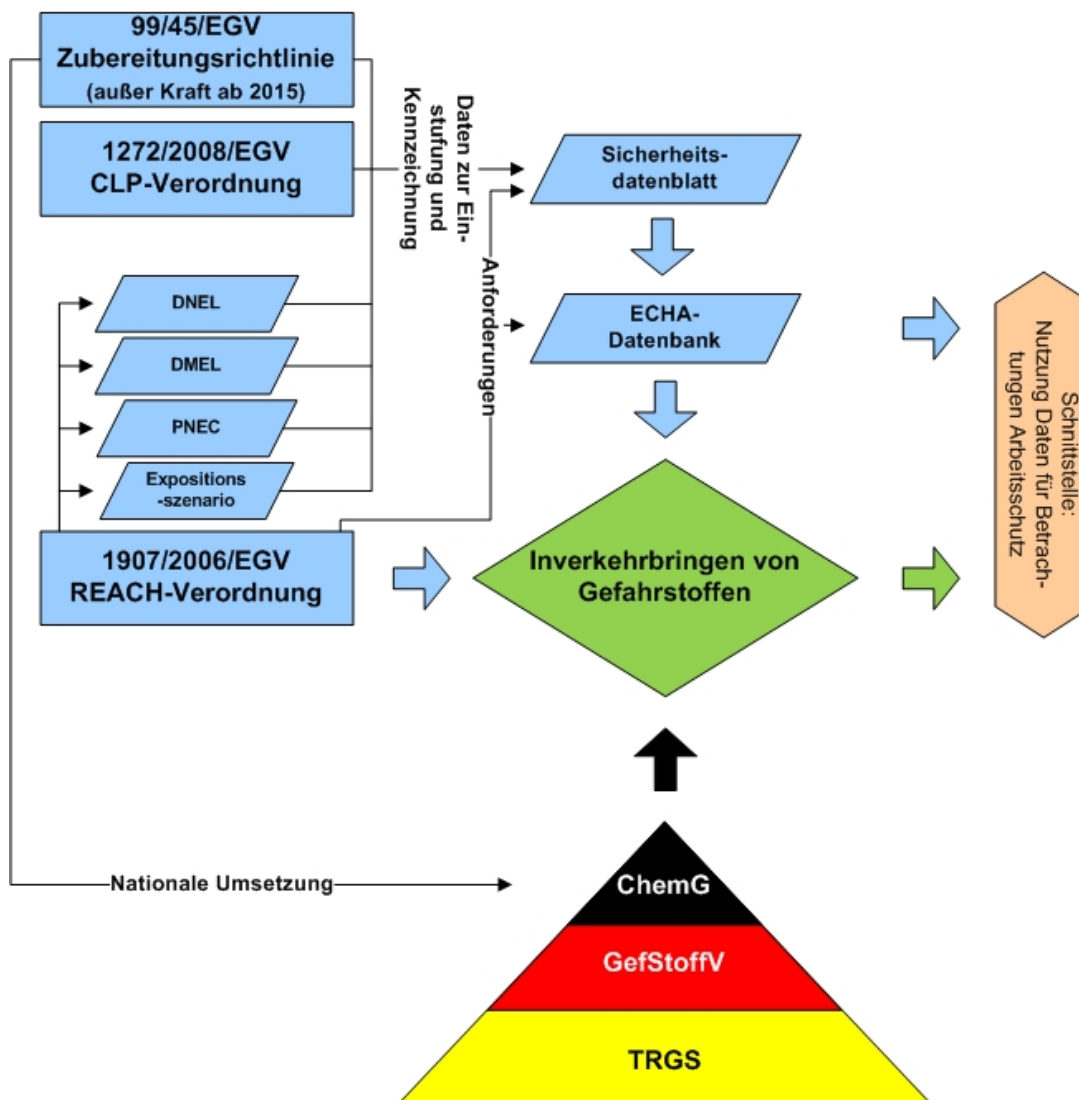


Abbildung 2.2: Auszug zur Rechtsstruktur der stoffspezifischen Produktsicherheit [7]

Auf nationaler Ebene erfolgt bisher die Umsetzung der Stoff- bzw. Zubereitungsrichtlinien sowie der Richtlinie 91/155/EWG im Rahmen des Chemikaliengesetzes (ChemG) [31] (siehe Abb. 2.2). Die Anforderungen führen die Bestimmungen der einzelnen Richtlinien unter Wahrung des beabsichtigten europäischen Schutzniveaus zusammen und bilden eine einheitliche Struktur, die mit Hilfe von Verweisen auf die relevanten Richtlinien Bezug nimmt. Das Chemikaliengesetz wird im Weiteren durch Teile der untergeordneten Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)

³⁴ Die Anwendung der auslaufenden Richtlinien ist während der Übergangsfristen noch zulässig, so dass diese noch Einfluss auf das Sicherheitsdatenblatt haben.

³⁵ Die Anlage einer Stoffdatenbank ist Teil des grundlegenden Konzeptes zur Produktsicherheit, das durch 1907/2006/EGV geregelt wird.

[1] konkretisiert; an diese schließen sich als untergesetzliches Regelwerk die "Technische Regeln für Gefahrstoffe" (TRGS, z.B. [32]) zur weiteren Erläuterung an.

Mit Außerkrafttreten der Richtlinien werden die Regelungen zum Inverkehrbringen sowie zur Einstufung und Kennzeichnung ausschließlich durch Verordnungen mit unmittelbarer Gültigkeit getroffen. Eine nationale Umsetzung wird ab diesem Zeitpunkt nicht erforderlich sein, so dass die entsprechenden Teile des Chemikaliengesetzes und angeschlossener Dokumente unwirksam werden. Eine teilweise Überarbeitung des Chemikaliengesetzes, z.B. zur Aufführung von Ausführungshinweisen und koordinativen Hilfestellungen, ist bereits erfolgt und wird weiter verfolgt.

2.1.3 Gefahrstoffe im Regelungsgegenstand der Arbeitssicherheit

Im Gegensatz zu den EU-Rechtsakten der Produktsicherheit, die auf die Angleichung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für das Inverkehrbringen von Produkten mit dem Ziel eines einheitlichen europäischen Binnenmarktes hinführen, stehen die Anforderungen des Artikels 153 AEUV [16] in anderem Kontext: Mit den aufgeführten Rahmenbedingungen sowie den angeschlossenen Regelwerken sollen im Zuge eines Sozialprogramms Arbeitsbedingungen für alle Beschäftigten in der europäischen Gemeinschaft geschaffen werden, die eine möglichst sichere Durchführung von Tätigkeiten gewährleisten. Dementsprechend liegt der Betrachtungsgegenstand auf den am Arbeitsplatz konkret auftretenden betriebsbedingten Gefährdungen.

Auf europäischer Ebene konkretisiert zunächst die sog. Rahmenrichtlinie Arbeitsschutz (89/391/EWG [33]) die durch den Art. 153 AEUV festgelegten Zielstellungen. Diese definiert Grundsätze, durch die der Arbeitgeber zur Sicherstellung entsprechender Arbeitsbedingungen in der Verantwortung steht. Für den Betrachtungsgegenstand der Gefahrstoffe erfolgt eine weitergehende Anpassung der in der Rahmenrichtlinie festgelegten Grundsatzanforderungen durch die EG-Richtlinie 98/24/EG [34], welche Bezug auf eine stoffspezifische Gefährdung nimmt.

Auf nationaler Ebene wurden die Anforderungen der Rahmenrichtlinie Arbeitsschutz 1996 durch das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) [35] in nationales Recht des Bundes umgesetzt. Das Arbeitsschutzgesetz befasst sich mit den Aufgaben des Arbeitgebers zur Vermeidung bzw. Minimierung von Gesundheitsgefährdungen für Beschäftigte, der weitreichende Pflichten übertragen bekommt. Zentrale Pflicht des Arbeitgebers ist dabei die Beurteilung der jeweiligen Arbeitsbedingungen im Hinblick auf mögliche Gesundheitsschädigungen der Beschäftigten im Zuge der Gefährdungsbeurteilung. Diese dient dem Ziel der Festlegung von ggf. erforderlichen Schutzmaßnahmen.

Im Hinblick auf stoffliche Gefährdungen erfolgt die Konkretisierung des Arbeitsschutzgesetzes durch Teile der Gefahrstoffverordnung [1], die der nationalen Umsetzung der EG-Richtlinie 98/24/EG dienen. Die Vorgaben umfassen gefahrstoffbezogene Anforderungen an die Gefährdungsbeurteilung sowie die Auswahl von Schutzmaßnahmen für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. Die Gefahrstoffverordnung bildet durch die Bezüge auf das Chemikaliengesetz und das Arbeitsschutzgesetz einen stoffbezogenen Schnittpunkt zwischen den Rechtsbereichen der Produkt- und Arbeitssicherheit und hat dadurch signifikante Wirkung auf einen weiten Teil des Produktzyklus von Gefahrstoffen. Zur weiteren Spezifizierung der Aspekte des Arbeitsschutzes der Gefahrstoffverordnung bestehen verschiedene Technische Regeln (z.B. [36]) sowie Regelungen der Unfallversicherungsträger (bspw. [37]³⁶).

³⁶ Die vorliegende Arbeit geht aufgrund der Differenzierungen und der großen Zahl der Vorschriften nicht auf das Regelwerk der Unfallversicherungsträger ein.

2.1.4 Schutzzielkonzept und stoffspezifische Gefährdungsbeurteilung

Unter Beachtung der beiden wesentlichen sicherheitsbezogenen Regelungsgegenstände des AEUV ist der betriebliche Umgang mit Gefahrstoffen, der an dieser Stelle von Bedeutung ist, in den Bereich des Arbeitsschutzes³⁷ einzuordnen. Dieser verfolgt gemäß § 1 ArbSchG [35] den Zweck,

”(...) Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu sichern und zu verbessern.“

Dementsprechend ist das ganzheitliche Schutzziel des Arbeitsschutzes, Gesundheitsschäden Beschäftigter infolge von Unfällen, arbeitsbedingten Erkrankungen oder Berufskrankheiten durch Analyse und Bewertung betrieblicher Gefährdungen sowie Ergreifen abgestimmter Schutzmaßnahmen zu vermeiden oder zu minimieren. Die Arbeitsbedingungen³⁸ sind daher unter Berücksichtigung der potentiellen Gefährlichkeit verwendeter Arbeitsmittel und -stoffe so zu gestalten, dass die berufliche Tätigkeit zu keinem Zeitpunkt der Lebensarbeitszeit eines Beschäftigten einen Gesundheitsschaden hervorruft.

Um dieses allgemeine Schutzziel in der betrieblichen Praxis sicherzustellen, ist der Arbeitgeber gemäß Arbeitsschutzgesetz für die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung (vgl. § 5 ArbSchG [35]) verantwortlich. Diese beinhaltet die vollständige Betrachtung der Arbeitssituationen der Beschäftigten, indem die Beurteilung alle Informationen zu Arbeits- und relevanten Umgebungsbedingungen ermittelt³⁹, im Anschluss aufgrund dieser Informationen eine Feststellung möglicherweise vorliegender Gefährdungen (z.B. durch den Abgleich mit zulässigen Grenzwerten) auf Grundlage des Maßstabs des Gesundheitsschutzes durchführt⁴⁰ und abschließend geeignete Maßnahmen (Gestaltung der Arbeitsbedingungen) zum Schutz der Beschäftigten festlegt. Die Umsetzung dieser Vorgabe durch die Unternehmen kann stichprobenhaft durch die Landesbehörden (zuständige staatliche Aufsichtsbehörden) oder im Rahmen eines Kooperationsmodells durch die Unfallversicherungsträger überprüft werden; weiterhin kann es im Anschluss an einen eingetretenen Arbeitsunfall oder im Zuge von Ermittlungen zur Anerkennung einer Berufskrankheit zu einer Nachweispflicht vorhandener Gefährdungsbeurteilungen kommen.

Die Gefahrstoffverordnung trifft wesentliche Rahmenregelungen zur erforderlichen stoffbezogenen Gefährdungsbeurteilung, die für Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen von sog. fachkundigen Personen⁴¹ durchzuführen ist. Dabei werden keine Vorgaben zu Mindestschritten einer Gefährdungsbeurteilung oder einzusetzenden Verfahren gemacht, sondern an verwendete Verfahren die Anforderung gestellt, dass diese dem Stand der Technik⁴² (Bestandteil der drei sog. Technik Klauseln⁴³) entsprechen, um über den Einsatz geeigneter Ansätze sicherzustellen, dass

³⁷ Da die deutsche Gesetzgebung als Umsetzung europäischer Richtlinien erfolgte, wird an dieser Stelle lediglich eine Betrachtung des Arbeitsschutzgesetzes samt angegliederter Regelwerke angestellt (vgl. S. 15).

³⁸ Parameter, die den Expositionsaspekt entsprechend dem allgemeinen Gefährdungsmodell beschreiben (vgl. S. 2).

³⁹ Im Sinne des allgemeinen Schutzziels: Analyse.

⁴⁰ Im Sinne des allgemeinen Schutzziels: Bewertung.

⁴¹ Fachkundige Personen müssen gemäß GefStoffV über die notwendige Ausbildung und Erfahrung zur Beurteilung stoffspezifischer Arbeitsbedingungen verfügen [1]. In der Regel sind dies Betriebsärzte oder Fachkräfte für Arbeitssicherheit nach Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG) [38].

⁴² Gemäß § 3 (12) GefStoffV der *“Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind.“* [1]. Ein Vorgehen zur Ermittlung wird durch TRGS 460 *“Handlungsempfehlung zur Ermittlung des Standes der Technik“* [39] vorgeschlagen.

⁴³ Zusätzlich werden *“Anerkannte Regeln der Technik“* mit geringeren sowie der *“Stand von Wissenschaft und Technik“* mit höheren Anforderungen verwendet.

auf das allgemeine Schutzziel des Arbeitsschutzes (Vermeidung akuter und dauerhafter Gesundheitsschäden) hingewirkt wird. Um diese Anforderung zu erfüllen, sind die zur Anwendung vorgesehenen Verfahren vor der Verwendung entsprechend zu überprüfen. So ist bspw. im Rahmen des europäischen Ansatzes für harmonisierte Normen zu vermuten, dass diese zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dem Stand der Technik entsprochen haben.

Auf untergesetzlicher Ebene führen Technischen Regeln für Gefahrstoffe den Ablauf stoffspezifischer Gefährdungsbeurteilungen sowie Anforderungen an verwendbare Methoden aus: Im Rahmen der TRGS 400 [40], die sich explizit mit der Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen befasst, werden dazu als Teilschritte u.a. die Informationsermittlung zu Tätigkeit und Gefahrstoff, die Ermittlung und Bewertung vorliegender Expositionen bzw. Gefährdungen, die Ableitung geeigneter Schutzmaßnahmen für Beschäftigte, eine entsprechende Dokumentation sowie die abschließende Wirksamkeitsüberprüfung der Maßnahmen aufgeführt und für verschiedene Fälle näher beschrieben⁴⁴. Die Wirksamkeitsüberprüfung muss dabei einmal im Anschluss an die eigentliche Gefährdungsbeurteilung⁴⁵ sowie in erforderlichen Abständen zur Überprüfung und Revision der Gefährdungssituation⁴⁶ anhand von Bewertungskriterien⁴⁷ durchgeführt werden. Die Regelungen greifen somit das bereits durch das Arbeitsschutzgesetz vorgesehene Verfahren zur Analyse (Informationsermittlung), Bewertung (Ermittlung von Expositionen sowie Wirksamkeitsüberprüfung) und Gestaltung (Ergreifung von Maßnahmen) im Hinblick auf stoffspezifische Betrachtungen auf und erweitern dieses (vgl. Abb. 2.3).

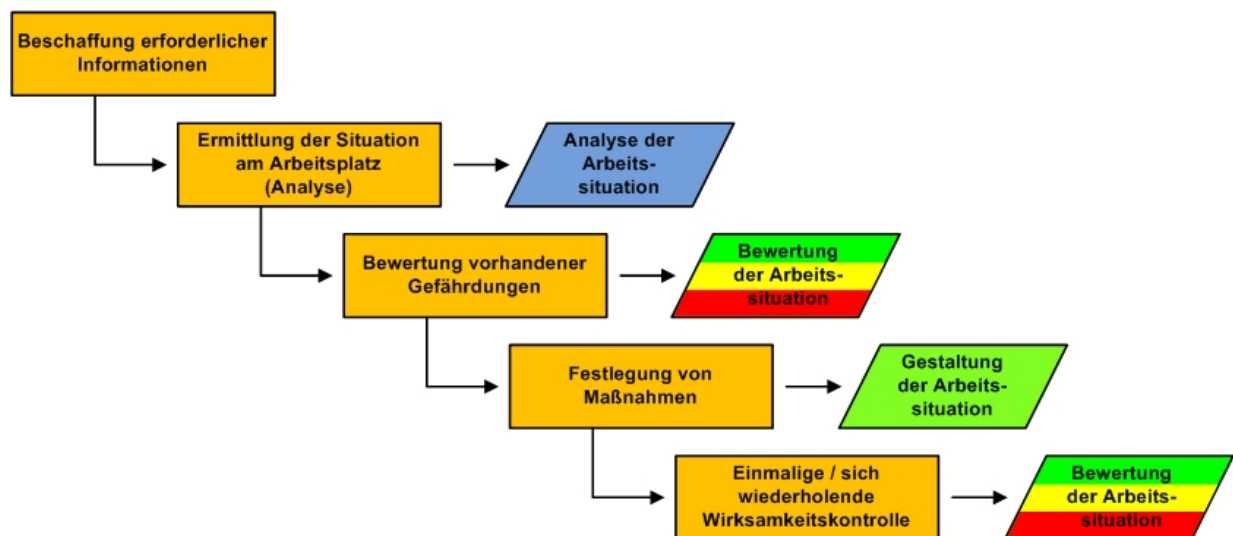


Abbildung 2.3: Ablauf der stoffspezifischen Gefährdungsbeurteilung [7]

Expositionsermittlung und Wirksamkeitsüberprüfung zielen auf die Ermittlung und Quantifizierung von Gefahrstoffen, die negative Wirkungen auf Beschäftigte ausüben können, sowie die Bewertung ab und stellen somit den Teilbereich der Analyse und Bewertung der Arbeitsbedingungen dar. Für diese Schritte beschreibt die TRGS 400 verschiedene Verfahren: Zur Expositionsermittlung als Analyse der Arbeitsbedingungen wird die Möglichkeit zur alternativen Anwendung von Messverfahren oder sog. "qualifizierte Expositionsabschätzungen" zugelassen; zur

⁴⁴ Z.B. Detaillierung der Informationsermittlung.

⁴⁵ Überprüfung der tatsächlichen Eignung ergriffener Schutzmaßnahmen nach der betrieblichen Umsetzung im praktischen Einsatz, jedoch vor Aufnahme der Tätigkeit.

⁴⁶ Z.B. Kontrolle der Übereinstimmung der Arbeitssituation mit der beurteilten Tätigkeit und technische Begutachtung ergriffener Maßnahmen.

⁴⁷ Vgl. Konkretisierung des allgemeinen Schutzzieles, S. 19.

Wirksamkeitsüberprüfung als Bewertungsschritt werden Messungen sowie Berechnungen angeführt.

Die TRGS 402 [41], welche die Beurteilung inhalativer Gefährdungen weiter ausführt, stellt Verfahren zur Erhebung eines sog. Befundes samt Anforderungen dar. Der Befund soll eine Bewertung zu ausreichenden Schutzmaßnahmen für Beschäftigte erzielen und ist somit im eigentlichen Sinn dem Schritt der Wirksamkeitsüberprüfung zugeordnet. Da jedoch auch Expositionsermittlungen im Rahmen der vorgelagerten Schritte der Gefährdungsbeurteilung erforderlich sind, wird die Zulässigkeit der Methoden für beide Aspekte eingeräumt. Im Einzelnen dürfen nach TRGS 402 folgende Verfahren angewendet werden⁴⁸:

- **Stoffmessungen**, die den Leistungsanforderungen nach DIN EN 482 [42] sowie dem Vorgehen nach DIN EN 689 [43] entsprechen.
- Übertragungen der Ergebnisse von Beurteilungen anderer Arbeitsplätze (sog. **Analogieschlüsse**) als **qualifizierte Expositionsabschätzung**, sofern die vorliegenden Expositionsbedingungen vergleichbar sind.
- **Berechnungsansätze** als **qualifizierte Expositionsabschätzung**, wenn die gewonnenen Ergebnisse plausibel sind sowie die Eignung eines Verfahrens für die vorliegende Arbeitssituation aufgrund der Rahmenbedingungen begründbar ist.

Im Gegensatz zu TRGS 402 (inhalative Gefährdungen) erläutert TRGS 401 [44] die Aspekte zur Beurteilung von dermalen Gefährdungen. Diese beinhaltet keine weiteren Detaillierungen zu angemessenen Verfahren zur Gefährdungsermittlung und -bewertung, so dass die allgemein anwendbaren Ansätze der TRGS 400 Verwendung finden.

Der Bewertungsschritt einer Gefährdungsbeurteilung bzw. die wiederkehrende Wirksamkeitsüberprüfung mit den zur Verfügung stehenden Verfahren stellen fest, ob die vorliegenden Arbeitsbedingungen mit dem Schutzziel des Arbeitsschutzes übereinstimmen. Das Arbeitsschutzgesetz formuliert dieses abstrakt (vgl. S. 16) und macht zur Umsetzung im Rahmen betrieblicher Maßnahmen eine Detaillierung im Hinblick auf vorliegende Arbeitssituationen innerhalb eines gesamten Schutzzielkonzeptes notwendig. Die somit erforderlichen Spezifikationen erfolgen zum Teil in dem Arbeitsschutzgesetz nachgeordneten Regelwerken. Darüber hinaus ist eine Anpassung im Rahmen der spezifischen Gefährdungsbeurteilungen erforderlich:

Gemäß Gefahrstoffverordnung [1] dient die Gefährdungsbeurteilung dem Ziel,

„durch (...) Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und anderen Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen (...) den Menschen und die Umwelt vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen.“

Es ergibt sich somit die Konkretisierung des allgemeinen Schutzziels, dass Handhabungen von Gefahrstoffen sicherzustellen sind, bei denen aus den stoffspezifischen Eigenschaften (Aspekt "Hazard") in Verbindung mit den Arbeitsbedingungen (Aspekt "Exposition") weder akute noch langfristige negative Auswirkungen für die Gesundheit der Beschäftigten resultieren. Dies schließt gleichzeitig neben der Betrachtung von Tätigkeiten im Normalbetrieb die Beurteilung von Tätigkeiten der Wartung und Instandhaltung sowie möglicher Freisetzungen im Schadenfall (z.B. Betriebsstörungen, vgl. § 13 GefStoffV [1]) ein.

Gemäß des allgemeinen Gefährdungsmodells (vgl. Abb. 1.1) weisen verschiedene Gefahrstoffe aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften unterschiedliche Schädigungspotentiale auf, so dass eine allgemeine Bewertung im Hinblick auf die Schutzzieldefinition des ArbSchG bzw. der Konkretisierung nach GefStoffV pauschal nicht erfolgen kann. Um eine Bewertung von Arbeitssituationen im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung stoff- und tätigkeitsspezifisch dennoch durchführen zu können, bedarf es geeigneter, in der Gefährdungsbeurteilung aufgeführter Bewertungskriterien. Die Einhaltung dieser Kriterien über die gesamte Tätigkeitsdauer hinweg dient

⁴⁸ Die Ausführungen der TRGS 402 erläutern gleichermaßen die Verfahren, die in der TRGS 400 genannt werden.

dabei dem unmittelbaren Nachweis der kurz- und langfristigen Schutzzielkonformität. Prinzipiell stehen zur abschließenden Schutzzielkonkretisierung innerhalb der Gefährdungsbeurteilung entsprechend GefStoffV zwei Optionen zur Verfügung: Für eine begrenzte Stoffanzahl existieren sog. Arbeitsplatzgrenzwerte⁴⁹ (AGW), die die TRGS 900 [45] veröffentlicht. Bei Verwendung eines derartigen Stoffes muss der entsprechende AGW zur stoffspezifischen Gefährdungsbeurteilung unmittelbar rechtsverbindlich herangezogen werden. Mit Einhaltung des AGW durch die tatsächliche Stoffkonzentration in der Luft am Arbeitsplatz darf angenommen werden, dass unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren und Schutzmaßnahmen die Grundanforderung des Arbeitsschutzes (vgl. S. 16) erfüllt wird. Besteht für einen vorhandenen Stoff kein AGW, so müssen andere geeignete Kriterien hinzugezogen werden. Hierzu können insbesondere Analogiebetrachtungen zu anderen Stoffen vergleichbarer Charakteristika, DNEL- und DMEL-Grenzwerte (vgl. S. 13), Expositionsszenarien nach REACH oder im Ausland geltende Grenzwerte genutzt werden. Ist dies der Fall, so muss eine Abwägung über die Plausibilität durchgeführt werden, die insbesondere die Überprüfung beinhaltet, dass an dieser Stelle ebenso der Stand der Technik abgedeckt wird. Der prinzipielle Aufbau des Schutzzielkonzepts gegenüber Gefahrstoffen wird in Abbildung 2.4 skizziert.

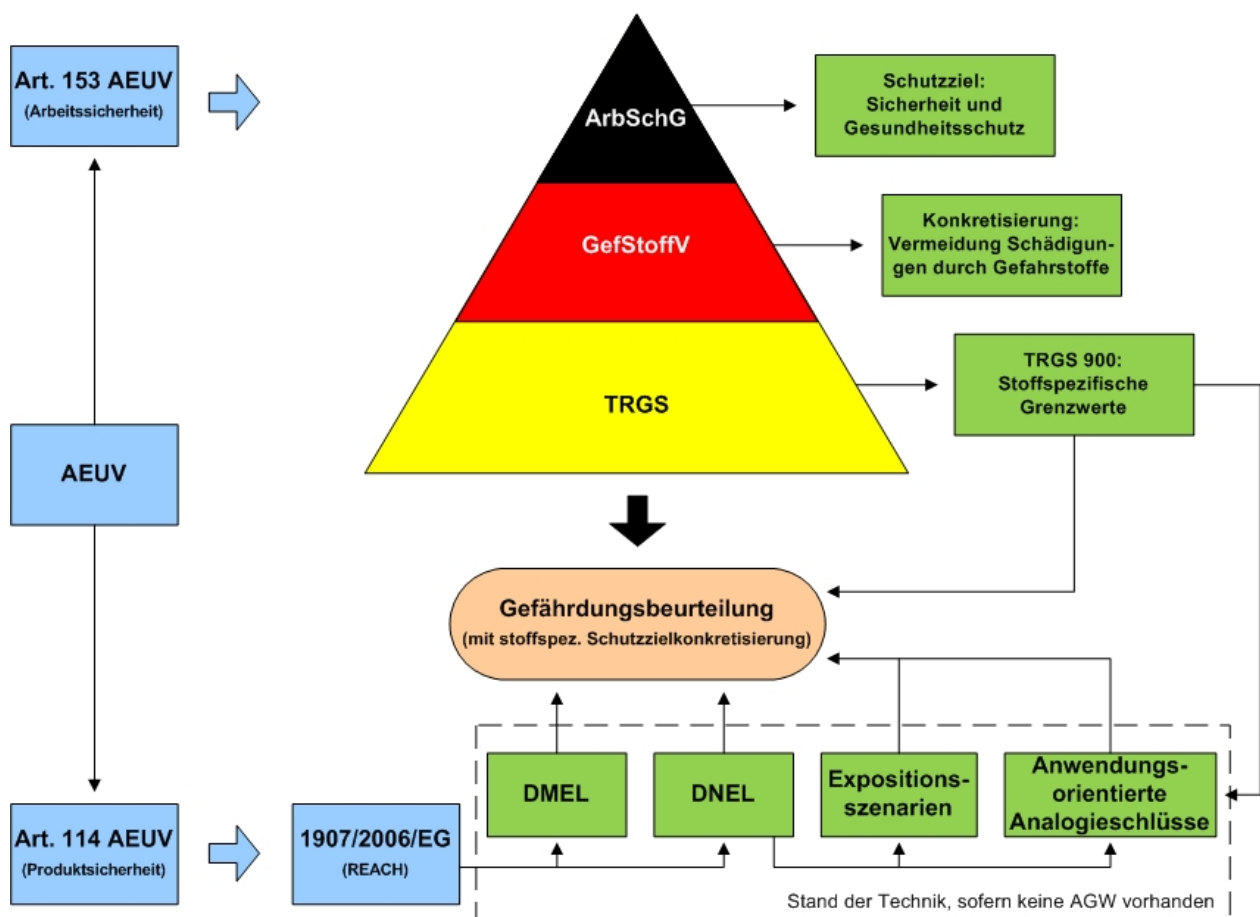


Abbildung 2.4: Schutzzielkonzept für Gefahrstoffe [7]

⁴⁹ Mittlere Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei deren Einhaltung akute oder chronische schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit im Allgemeinen nicht zu erwarten sind. Die Grenzwerte beziehen sich als Schichtmittelwerte auf eine Schichtdauer von 8 Stunden an 5 Arbeitstagen in der Woche über ein gesamtes Arbeitsleben hinweg [1].

2.2 Brandschutz: Gesetzliche Grundlagen und Schutzzielkonzept

Brandgeschehen, bei denen Menschen zu Schaden kommen können, finden mit wenigen Ausnahmen (z.B. Schiffshavarien) in oder an Gebäuden statt. Dementsprechend werden Anforderungen an bauliche Anlagen sowie an die beim Bau verwendeten Komponenten (sog. Bauprodukte) gestellt, welche die Sicherheit sich darin aufhaltender Personen gegenüber Brandereignissen gewährleisten.

Maßnahmen des sog. baulichen Brandschutzes⁵⁰ dienen der Gewährleistung der Sicherheit bei Bränden in Gebäuden. Innerhalb des deutschen Rechtsgefüges stellen - in Abstimmung auf europäische Forderungen - verschiedene Rechtsinstrumente Anforderungen an die zu verwendenden Bauprodukte sowie deren sicherheitsorientierte Anordnung in Gebäuden. Diese setzen verschiedene Schutzziele um, die neben der Sicherheit von Personen nicht nur die Vermeidung der Entstehung und die Beherrschung eines Brandes, sondern ebenso des einhergehenden Brandrauches⁵¹ verfolgen.

2.2.1 Rechtssystematik des Brandschutzes

Ein Gebäude wird aus verschiedenen Bauprodukten errichtet und den Nutzern zur Verfügung gestellt. Dementsprechend stellen Gebäude im Gesamten sowie die notwendigen Baustoffe Produkte dar, für die im Sinne der europäischen Gesetzgebung und deren nationaler Umsetzung verschiedene Aspekte zum Inverkehrbringen zu beachten sind. Weiterhin muss die Verwendung unterschiedlicher Produkte und ergänzender Maßnahmen dem inhärenten Schutz der späteren Gebäudenutzer dienen, der entsprechende Verwendungsvorschriften erfordert.

Im Rahmen der europäischen Gesetzgebung zum Art. 114 AEUV (Regelungsbereich der Produktsicherheit) werden Bestimmungen für Bauprodukte⁵² durch die sog. Bauproduktenverordnung (EU/305/2011) [47, 48] beschrieben, die zum 01.07.2013 die Bauproduktenrichtlinie (89/106/EWG) [49] abgelöst hat. Die Bauproduktenverordnung stellt sog. wesentliche Merkmale als Produkteigenschaften bzw. Grundanforderungen an Bauwerke auf, die auf die Sicherheit von Personen sowie eines Gebäudes selbst abzielen. Es werden grundlegende Sicherheitskriterien zur Erreichung eines angemessenen Sicherheitsniveaus definiert. Zu diesen Kriterien gehören Anforderungen an den Brandschutz sowie an weitere Faktoren, wie z.B. die Tragfähigkeit und die Standsicherheit eines Gebäudes. Die wesentlichen Merkmale von Bauprodukten können in diesem Rahmen von der europäischen Kommission mit entsprechenden Auslegungshilfen konkretisiert werden. Während dies im Rahmen der Bestimmungen der abgelösten Bauproduktenrichtlinie durch anforderungsspezifische Grundlagendokumente zur Festlegung von Detailregelungen erfolgte, bestehen derartige Regelungen zur Bauproduktenverordnung zurzeit nicht. Die unterschiedlichen Grundlagendokumente, die im Rahmen der Bauproduktenverordnung keine Erwähnung mehr finden, sind jedoch nicht aufgehoben worden und behalten somit ihren fachlichen Wert, der - bis auf Weiteres - entsprechend genutzt werden kann [50, 51]. Die Bauproduktenverordnung reglementiert neben der Einführung sicherheitsrelevanter Anforderungen allgemein u.a. die Zulassungsverfahren und die Kennzeichnung von Bauprodukten.

⁵⁰ Bauliche, anlagentechnische und organisatorische Maßnahmen zum Schutz von Personen, die sich innerhalb von Gebäuden aufhalten, vor den Folgen eines Brandes.

⁵¹ Verletzungen oder Todesfälle von Menschen im Zusammenhang mit Brandereignissen sind zumeist nicht auf thermische Schädigungen, sondern vielmehr auf toxische oder reizende Komponenten des Brandrauches zurückzuführen [46].

⁵² Bauprodukt ist gemäß EU/305/2011 *„jedes Produkt oder jeder Bausatz, das bzw. der hergestellt und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerks im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt“* [47].

Für den Bereich des Brandschutzes entstehen spezifische Anforderungen an Bauprodukte aus dem "Grundlagendokument - Wesentliche Anforderung Nr. 2 - Brandschutz" [52]. Regelungen mit Bezug auf Eigenschaften von Bauprodukten (z.B. zulässige, in Brandversuchen zu ermittelnde Feuerwiderstandszeiten) unterscheiden sich von Anforderungen, die die sicherheitsorientierte Planung, den Einsatz und die Verwendung in Gebäuden beschreiben: Für verschiedene Arten an Bauprodukten (z.B. Trennwände) werden unterschiedliche Leistungsmerkmale verbal definiert, aus denen sich unmittelbar eine Klasseneinteilung ergibt. Die Kategorisierung ermöglicht damit eine Ausweisung der Sicherheitswirkung, die durch ein Bauprodukt (bei entsprechender Installation) erreicht werden kann. Darüber hinaus werden für die Verwendung in Gebäuden konzeptionelle Ansätze vorgegeben, welche durch die Kombination verschiedener Bauprodukte - in Abhängigkeit zu vorhandenen Risiken mit verschiedenen Leistungsklassen - eine ausreichende Sicherheit gewährleisten sollen.

Weitergehende Konkretisierung des "Grundlagendokuments Brandschutz" bzw. der wesentlichen Merkmale von Bauprodukten nach Bauproduktenverordnung (z.B. der getroffenen Verbaldefinitionen von Leistungsmerkmalen) erfolgt über die europäisch-harmonisierte Normung. Diese setzt bspw. die unterschiedlichen Definitionen in technisch prüfbare Merkmale um, die die Zuordnung von Bauprodukten in die vorgesehenen Leistungsklassen ermöglichen. Darüber hinaus werden Versuchsaufbauten und -geräte etc. reglementiert. Zusätzlich existieren normative Dokumente zu brandschutztechnischen Maßnahmen, die keine Bauprodukte sind (z.B. Feuerlöscher, vgl. [53]).

Die europäisch-harmonisierten und unmittelbar gültigen Festlegungen der EU-Bauproduktenverordnung zur Zulassung und Kennzeichnung bedürfen auf nationaler Ebene keiner Umsetzung. Während das Bauproduktengesetz (BauPG) [54] die Anforderungen zur Zulassung und Kennzeichnung der außer Kraft getretenen Bauproduktenrichtlinie umfassend umsetzte, enthält dieses zukünftig lediglich Konkretisierungen zur Durchführung der Bauproduktenverordnung in Deutschland [51]. Die erfolgten Änderungen führt das Gesetz zur Anpassung des BauPG (BauPGAnpG) [55] auf. Das BauPG unterliegt der Gesetzgebungskompetenz des Bundes und besitzt somit national einheitliche Gültigkeit.

Die Aspekte des "Grundlagendokuments Brandschutz" werden neben Bauproduktenverordnung und Bauproduktengesetz im Rahmen der Vorschriften der Landesbauordnungen und angeschlossener Regelwerke als Gestaltungsanforderungen an bauliche Anlagen umgesetzt, die als sog. Bauordnungsrecht in die Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer fallen. Die europäisch-harmonisierte Bauproduktenverordnung hat keine einschränkende Wirkung auf die Landesbauordnungen und angeschlossene Rechtsakte, so dass diese in ihrer Funktion und Aussage bestehen bleiben. Die beinhaltet Definition von Klasseneinteilungen sowie konkrete Vorschriften zu Planung und Einsatz erforderlicher brandschutztechnischer Bauprodukte erfolgt dabei innerhalb folgender grundsätzlicher Rechtsstruktur⁵³, die europäisch nicht harmonisiert ist:

Auf Gesetzesebene existieren landesspezifische Landesbauordnungen (z.B. [56]). Diese definieren einerseits prinzipielle Begriffe und Einteilungsklassen von Gebäuden, andererseits legen sie grundlegende und brandschutztechnische (sicherheitsrelevante⁵⁴) Regelungen zu "normalen" Bauvorhaben sowie Verfahrensweisen der Genehmigungsbehörden fest. Die konkreten Anforderungen an bauliche Anlagen umfassen Wohngebäude und Gebäude ähnlicher Art oder Nutzung (bspw. Gebäude mit Büro-Nutzungseinheiten), weshalb die eigentlichen Landesbauordnungen auch als "Wohnungsbauordnungen" bezeichnet werden.

⁵³ Aus der Ausübung der Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer resultieren unterschiedliche, landesspezifische Anforderungen. Die dargestellte Struktur kommt jedoch in allen Bundesländern - ggf. mit voneinander abweichenden Verordnungen und Richtlinien - zur Anwendung.

⁵⁴ Die Regelungen der Landesbauordnungen umfassen neben dem Brandschutz auch die übrigen wesentlichen Merkmale, wie z.B. die Standsicherheit. Diese sind jedoch im Gegensatz zum Brandschutz nicht explizit im Hinblick auf die Verwendung bestimmter Klassen von Bauprodukten reglementiert.

Die Landesbauordnungen unterscheiden von "normalen" Bauvorhaben sog. Sonderbauten (z.B. Verkaufsstätten oder Schulen), für die abweichende Sicherheitsniveaus⁵⁵ sichergestellt werden müssen. Für diese Sonderbauten werden in der folgenden Rechtsebene durch die Bundesländer die sog. Sonderbauverordnungen veröffentlicht, die weitergehende Anforderungen an die bauliche Ausbildung beschreiben und in diesem Sinne die Landesbauordnungen in bestimmten Fällen und Aspekten konkretisieren (z.B. [57]). Dabei enthalten die weitergehenden Anforderungen sowohl Erschwernisse als auch Erleichterungen von den grundsätzlichen Bestimmungen, die Landesbauordnungen behalten als Rahmengesetz für nicht konkretisierte Bereiche Gültigkeit. Existiert für eine Gebäudeart keine (länder-) spezifische Sonderbauverordnung, so muss der Charakter des Gebäudes im Rahmen der Planung gesondert berücksichtigt werden.

Über die Verordnungsebene der Gesetzgebung der Bundesländer hinaus existieren einerseits Verwaltungsvorschriften, welche die Anforderungen im Hinblick auf die Anwendung durch die Bauaufsichten näher erläutern. Andererseits können zur weiteren Konkretisierung durch das zuständige Landesministerium sog. "Technische Baubestimmungen⁵⁶" als untergesetzliche Regelwerke eingeführt werden, die dadurch im Rahmen der Bauplanung und -ausführung zu beachten sind. Ergänzend liegen für besondere Fragestellungen nationale Normen vor, die ebenfalls konkretisierende Anforderungen oder Aussagen treffen.

Durch die spezifischen Sichtweisen unterschiedlicher Bundesländer, die sich in Detailformulierungen der Anforderungstexte bzw. durch verschiedene Erlasse von Verordnungen und Richtlinien äußern, existieren im Überblick nicht deckungsgleiche Bauordnungen sowie untergeordnete Regelwerke. Um diesem Umstand entgegen zu wirken und ein einheitliches Schutzniveau über das gesamte Bundesgebiet zu schaffen, findet regelmäßig die sog. Bauministerkonferenz statt. Diese erarbeitet zu den einzelnen Gesetzgebungsinstrumenten Musterdokumente, welche als Grundlage für Überarbeitungen landesspezifischer Regelungen gedacht sind. Über diesen Weg wird eine länderübergreifende Anpassung der Anforderungen angestrebt, wobei die erarbeiteten Dokumente der Muster-Bauordnung (MBO) [59] und Muster-Sonderbauverordnungen (MSBauVO) keine Verbindlichkeit besitzen⁵⁷.

2.2.2 Schutzzielkonzept und Brandschutznachweis

Bei Brandereignissen in Gebäuden ist nicht davon auszugehen, dass der Zeitpunkt ihres Eintretens abgeschätzt werden kann; es handelt sich um ein spontan auftretendes Schadenereignis. Somit sind alle notwendigen Maßnahmen zur Sicherstellung des Brandschutzes dauerhaft durch eine entsprechende Dimensionierung auszulegen; der Moment der erforderlichen Wirksamkeit ist nicht zeitlich planbar. Aus diesem Grund besteht gemäß § 3 (1) MBO die allgemeine sicherheitstechnische Anforderung,

"Anlagen (...) so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden."[59]

⁵⁵ In Abstimmung auf zu erwartende Risikofaktoren, wie z.B. erhöhte Personenanzahlen in Versammlungsstätten.

⁵⁶ Technische Baubestimmungen geben detaillierte Maßgaben zu spezifischen Fragestellungen, die aufgrund des Umfangs nicht unmittelbar in die Regelungen der Bauordnungen einfließen sollen, z.B. Anforderungen an die Mindestausbildung von Bauteilen (DIN 4102 [58]). Insbesondere Normen besitzen jedoch nicht aus sich heraus die Bedeutung einer technischen Baubestimmung.

⁵⁷ Die nachfolgenden Betrachtungen ziehen aufgrund des empfehlenden Charakters die Musterbauordnung sowie die angeschlossenen Verordnungen und Richtlinien als Empfehlungen zur Umsetzung durch die Bundesländer heran. Landesspezifische Regelwerke formulieren deckungsgleiche Absichten, die mit Abweichungen in der konkreten baulichen Ausbildung (z.B. Anforderungen an Verschlüsse für Öffnungen in Wänden) entsprechende Anforderungen spezifizieren.

Sog. Schutzziele, denen die Maßnahmen des vorbeugenden Brandschutzes dienen sollen, konkretisieren diese weiter. Die Schutzziele des Brandschutzes führt § 14 MBO explizit auf:

”Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass

- der Entstehung eines Brandes und*
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und*
- bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie*
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.” [59]*

Die Schutzziele sind nicht singulär zu verstehen, sondern beeinflussen sich untereinander dahingehend, dass sie in ihrer Gesamtheit vornehmlich dem Personenschutz dienen⁵⁸. Grundsätzlich gehen die Anforderungen von einer Selbst- oder Fremdreueung von Personen aus betroffenen Gebäuden aus, die innerhalb einer begrenzten Zeitspanne abgeschlossen ist. Dementsprechend müssen die vorgesehenen Maßnahmen, die das bauordnungsrechtliche Sicherheitsniveau definieren, lediglich über einen ausreichenden Zeitraum nach Brandbeginn - nicht ständig, sondern für die Dauer erforderlicher Evakuierungs- und Rettungsmaßnahmen - wirksam sein.

Bei Beachtung der durch die jeweilige Landesbauordnung und angeschlossenen Technischen Baubestimmungen definierten Anforderungen während der Planung oder Umnutzung eines Gebäudes ist davon auszugehen, dass die genannten Schutzziele und das beabsichtigte Sicherheitsniveau eingehalten sind. Für bestimmte Gebäude, insbesondere für Sonderbauten, fordert das baurechtliche Genehmigungsverfahren dazu einen sog. Brandschutznachweis, den qualifizierte Personen (i.d.R. sog. Brandschutzsachverständige⁵⁹) aufstellen und den eine Genehmigungsbehörde prüft (sog. 4-Augen-Prinzip). Dieser dient dem ganzheitlichen Nachweis⁶⁰, dass die beabsichtigten Planungen den Schutzzielen des Brandschutzes hinreichend Sorge tragen. Es erfolgt ein Abgleich der ausgearbeiteten Gestaltung eines Gebäudes mit den präskriptiven Anforderungen der jeweils gültigen Vorschriften sowie eine entsprechende Auslegung brandschutztechnischer Maßnahmen. Eine weitere Konkretisierung der allgemeinen Schutzziele ist nicht erforderlich. Bei der anschließenden bautechnischen Umsetzung der grundlegenden Konzeption kommen zugelassene und entsprechend klassifizierte Bauprodukte zum Einsatz.

Die Planung eines Gebäudes hängt im Wesentlichen von dessen angedachter Nutzung, der örtlichen Gegebenheit sowie u.a. den Gestaltungswünschen der Bauherren ab. Es ist daher nicht immer möglich, die in den Bauordnungen, Sonderbauverordnungen oder Technischen Baubestimmungen der Bundesländer gestellten Forderungen in ihrer Gesamtheit zu erfüllen. Um jedoch flexibel auf die Gestaltungsanforderungen einer baulichen Anlage reagieren zu können, bestehen zwei prinzipielle Möglichkeiten zur differierenden Planung. Voraussetzungen bilden jedoch sog. Kompensationsmaßnahmen, die der Sicherstellung des bauordnungsrechtlich geforderten Sicherheitsniveaus dienen sollen und in einem Brandschutznachweis erarbeitet und bewertet werden müssen:

⁵⁸ Bspw. bewirken Maßnahmen der Vorbeugung einer Brandausbreitung (zumeist klassifizierte Bauteile) u.a. die gefähndungsfreie Nutzung von Rettungswegen.

⁵⁹ Entsprechend der landesspezifischen bauordnungsrechtlichen Gesetzgebung sind die konkreten Benennungen in einzelnen Bundesländern verschieden. Neben der Erstellung von Brandschutznachweisen (Teil der Bauwerksplanung) differieren ebenso weitere Kompetenzen. Spezifische Anforderungen, z.B. zur Qualifikation, sind in entsprechenden Regelwerken formuliert (vgl. z.B. [60]).

⁶⁰ Gemäß Muster-Bauvorlagenverordnung (MBauVorIV) [61] muss ein Brandschutznachweis verschiedene Aspekte betrachten, um ein vollständiges Sicherheitskonzept darzustellen.

- Um von den landesspezifischen Bestimmungen der Bauordnungen bzw. der Sonderbauverordnungen unmittelbar abzuweichen, besteht gemäß § 67 MBO [59] die Möglichkeit, bei der Genehmigungsbehörde formell eine sog. Abweichung zu beantragen, die entsprechend genehmigt werden muss. Zu diesem Zweck ist ein Nachweis erforderlich, dass für die angeführten Kompensationsmaßnahmen die Vereinbarkeit mit den vorgegebenen Schutzziele besteht.
- Gleichermaßen besteht gemäß § 3 (3) MBO [59] die Möglichkeit, von den Regelungen der Technischen Baubestimmungen abzuweichen, sofern die Kompensationslösung in gleichem Maße die allgemeine sicherheitstechnische Anforderung an Gebäude (siehe S. 22) erfüllt. Dazu ist ebenso ein entsprechender Nachweis erforderlich, für den formal jedoch keine Genehmigungspflicht besteht.

Für die Art des Nachweises, der die Erfüllung des angestrebten Sicherheitsniveaus durch die angeführten Kompensationsmaßnahmen darlegt, bestehen keine Eingrenzungen. Vielmehr hat zwischen der Person, die einen Brandschutznachweis aufstellt, und der jeweils prüfenden Person eine Abstimmung über die Nachweisführung zu erfolgen. Es wird somit die Möglichkeit geschaffen, entsprechende Nachweise einerseits über erfahrungsbasierte Argumentationen zu begründen. Andererseits besteht - insbesondere bei strittigen bzw. kritischen Fragestellungen - die Option, notwendige Betrachtungen mittels Brandschutzingenieurmodellen (zu denen auch rechnerische und insbesondere Simulationsverfahren gehören) für die relevante Zeitspanne anzustellen. Als Sonderfall werden darüber hinaus in einzelnen Sonderbauverordnungen Ansatzpunkte geschaffen, nach denen zu verschiedenen Punkten Brandschutzingenieurmodelle unmittelbar verwendet werden können (vgl. Nachweise nach Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) [62]). Anforderungen an die Verfahren, welche die entsprechenden Nachweise einsetzen, bestehen mit Ausnahme einer nachvollziehbaren Plausibilität des Ansatzes und der Ergebnisse nicht, so dass auch für Brandschutzingenieurmodelle keine weiteren Einschränkungen erfolgen. Somit besteht eine Abhängigkeit zwischen der Anerkennung des Verfahrens und der Qualifikation der beteiligten Personen, die Argumentationen oder rechnerische Betrachtungen anstellen bzw. bauordnungsrechtlich prüfen. Die strukturellen Zusammenhänge im Rahmen der Gesetzgebung zur Planung und Errichtung von Gebäuden fasst Abbildung 2.5 als Überblick zusammen.

Der sinnvolle Einsatz von Brandschutzingenieurmodellen benötigt zum Zweck der Überprüfbarkeit weitere Konkretisierungen des jeweils betrachteten Schutzziele. Zur Begrenzung der Rauchausbreitung und der entstehenden Beeinflussung der Rettungswege eines Gebäudes ist es bspw. notwendig, zunächst ein System der Rauchableitung zu definieren. Die Überprüfung von dessen Wirksamkeit für das entsprechende Objekt, der Geometrien und der Rahmenbedingungen erfolgt über im Anschluss zu bildende Kriterien, die eine Bewertung des auftretenden Rauchgasstromes ermöglichen (üblich sind beispielsweise Betrachtungen zur Temperatur oder der Luftkonzentration kritischer Verbrennungsprodukte, vgl. z.B. [63]). Die anzusetzenden Kriterien sind durch den Anwender jedoch immer im Einzelfall, in Abhängigkeit zur Fragestellung und den Rahmenbedingungen, festzulegen und abzustimmen.

Vor dem Hintergrund des Zieles der Personenrettung aus betroffenen Bereichen müssen die festgelegten Kriterien innerhalb eines bestimmten Zeitraumes wirksam und mit Hilfe von Brandschutzingenieurmodellen nachgewiesen sein. Nach Abschluss der Personenrettung ist eine Erfüllung verschiedener Kriterien nicht mehr erforderlich, was den notwendigen Betrachtungszeitraum begrenzt.

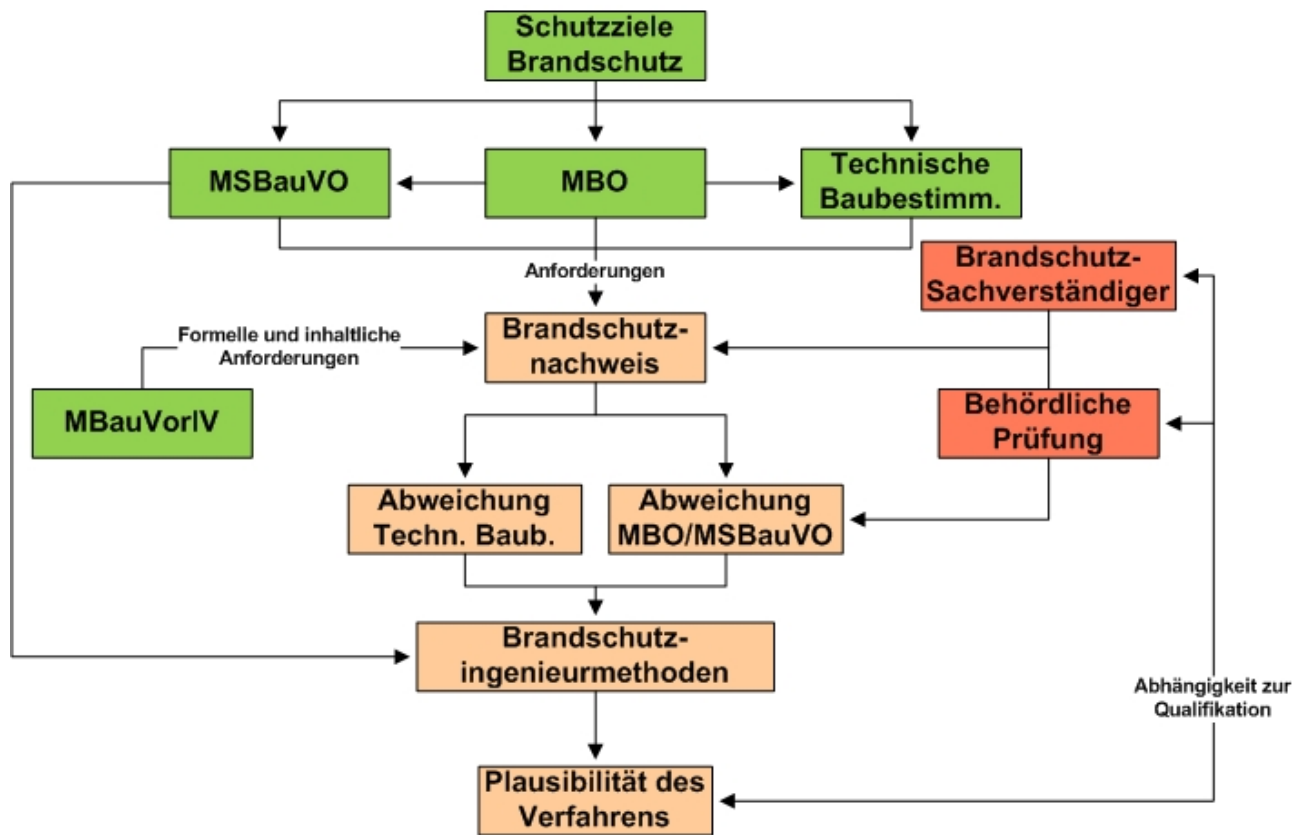


Abbildung 2.5: Auszug struktureller Zusammenhänge der Gesetzgebung zur Planung und Errichtung von Gebäuden [7]

2.3 Vergleich methodischer und sicherheitstechnischer Ansätze des Arbeits- und Brandschutzes

Die sicherheitstechnischen Disziplinen des Arbeits- und Brandschutzes weisen vor dem Hintergrund gesetzlicher Grundlagen verschiedene Analogien und Unterschiede auf. Trotz des beidseitigen grundsätzlichen Ansatzes, betroffene Personen vor Gesundheitsschäden aus arbeitsbedingten Tätigkeiten bzw. Brandereignissen zu bewahren, sind differierende Betrachtungs- und Vorgehensweisen reglementiert. Als Ergebnis zuvorstehender Grundlagenbetrachtungen ergibt sich - insbesondere im Hinblick auf rechnerische Verfahren als wesentlicher Gesichtspunkt dieser Arbeit - der nachstehende tabellarische Vergleich:

Vergleichsaspekt	Arbeitsschutz	Brandschutz
Grundlage Gesetzesinitiative	europäisch	national
Gesetzgebungskompetenz	Bund	Bundesländer
Schutzziel	Vermeidung Gesundheitsschäden Beschäftigter durch bei der Arbeit verwendete Gefahrstoffe	Schutz von in Gebäuden befindlichen Personen im Brandfall
Zeitbezug Schutzziel	akuter und langfristiger Schutz	akuter Schutz
Verfahren der Gesamtbeurteilung	Gefährdungsbeurteilung als Betrachtung von Tätigkeiten bzw. Arbeitssituationen	Brandschutznachweis als Darstellung der schutzzielkonformen Gebäudekonzeption

Vergleichsaspekt	Arbeitsschutz	Brandschutz
<i>Konzeptionelles Vorgehen der Gesamtbeurteilung</i>	Strukturierte Analyse und Bewertung der Arbeitssituation samt Umgebungsbedingungen sowie Ergreifen angepasster Gestaltungsmaßnahmen (samt Wirksamkeitsüberprüfung) zur Schutzzielerrreichung	Nachweis bauordnungsrechtlicher Vorgaben als Darstellung der erreichten Schutzzielkonformität; bei Abweichungen gesonderter Nachweis (z.B. durch Kompensationen)
<i>Vorgaben zu Ablauf und Inhalt der Gesamtbeurteilung</i>	Schrittfolge Gefährdungsbeurteilung nach [40]	Brandschutznachweis gem. [61]
<i>Betrachtungsfälle</i>	Normalbetrieb, Wartung und Schadenfall Stoffaustritt	Schadenfall Brand
<i>Bewertungskriterien als Schutzziel-Konkretisierung</i>	Arbeitsplatzgrenzwerte (sofern aus [45] verfügbar); sonst: aus anderen Quellen abgeleitete Parameter	Bei vorschriftskonformer Planung keine Konkretisierung erforderlich; sonst: Abstimmung zwischen beteiligten Personen gemäß Fragestellung
<i>Zeitbasis der Bewertungskriterien</i>	dauerhafte Kriteieneinhaltung für Normalbetrieb und Wartungsarbeiten	kurzfristige Kriteieneinhaltung (bis zum Abschluss von Evakuierungs- bzw. Rettungsmaßnahmen)
<i>Anwendung rechnerischer Verfahren</i>	Ansatz zur Gefährdungsbeurteilung oder Wirksamkeitsüberprüfung gemäß [40, 41]	Sicherheitsnachweis zur Begründung baulicher Abweichungen bzw. Entrauchungsnachweis verschiedener Sonderbauvorschriften
<i>Anforderungen an rechnerische Verfahren</i>	Stand der Technik, Plausibilität und Begründung Anwendbarkeit	Plausibilität
<i>Einsatz rechnerischer Verfahren durch</i>	fachkundige Personen	Brandschutz-Sachverständige
<i>Betrachtungsdauer rechnerischer Verfahren</i>	Dauer möglicher Expositionen (z.B. Tagesschicht)	Dauer der Evakuierung (z.B. 30 Minuten)
<i>Überprüfung der Betrachtungen</i>	stichprobenhaft durch staatliche Aufsichtsbehörde bzw. Unfallversicherungsträger (Kooperationsmodell) sowie nach Arbeitsunfall oder Verdacht einer Berufskrankheit	grundsätzlich durch Genehmigungsbehörde

Tabelle 2.1: Vergleich der Rahmenbedingungen zu rechnerischen Betrachtungen des Arbeits- und Brandschutzes

Zusammenfassend lassen sich aus der obigen Übersicht nachstehende Rahmenbedingungen bzw. Kernpunkte erkennen, welche in den anschließenden Betrachtungen berücksichtigt werden müssen und ggf. Notwendigkeiten von Anpassungen hervorrufen:

1. Die Disziplinen des Arbeits- und des Brandschutzes haben den Schutz von Personen zum Ziel. Der Arbeitsschutz grenzt den Betrachtungsgegenstand jedoch auf Beschäftigte eines Betriebes ein, die ggf. längerfristigen Expositionen ausgesetzt sind.
2. Betrachtungen des Brandschutzes setzen ein Brandereignis als Schadenfall voraus, das nur bedingt kontrolliert werden kann. Betrachtungen des Arbeitsschutzes sind demgegenüber im wesentlichen Teil für Tätigkeiten, die zum normalen Betriebsablauf zu zählen sind (Normalbetrieb sowie Wartungsarbeiten), auszuführen.
3. Arbeits- und Brandschutz verwenden voneinander abweichende Beurteilungskriterien, die aus den Konzepten des langfristigen Personenschutzes (Arbeitsschutz) bzw. des Schutzes für ein Zeitfenster zur sicheren Evakuierung von Personen (Brandschutz) resultieren.
4. Im Gegensatz zu Nachweisen des Brandschutzes, die lediglich eine geringe Zeitspanne umfassen und die kurzfristige Sicherheit von Personen beschreiben, erfordert der Arbeitsschutzes den Beleg einer dauerhaften Gefährdungsfreiheit. Numerische Verfahren müssen

- daher in der Lage sein, charakteristische - ausreichend lange - Expositionszeiträume modellieren zu können.
5. Sowohl im Arbeits- als auch im Brandschutz ist die Zulässigkeit numerischer Verfahren gegeben. Diese müssen jedoch gewissen Ansprüchen genügen, so dass die tatsächliche Anwendbarkeit eines Gesamtverfahrens überprüft werden muss. Dabei steht der Nachweis der Plausibilität eines Verfahrens (Brandschutz) den Anforderungen des Standes der Technik, der Plausibilität sowie der Begründung der Anwendbarkeit (Arbeitsschutz) gegenüber.
 6. Sollen Verfahren des Brandschutzingenieurwesens im Rahmen des Arbeitsschutzes verwendet werden, so müssen aufgrund unterschiedlicher Bewertungskriterien die erforderlichen Parameter als Ausgabewert zur Verfügung stehen.

Kapitel 3

Darstellung von Modellen und Konzepten zur Expositionsabschätzung

Zur Ermittlung und Bewertung stoffspezifischer Gefährdungen stehen sowohl für Betrachtungen des Arbeitsschutzes als auch des Brandschutzes unterschiedliche Strategien und verschiedene, dementsprechende Verfahren zur Verfügung. Dabei bilden rechnerische Betrachtungen zulässige Hilfsmittel (vgl. Kap. 2.1.4), welche die Ableitung erforderlicher Schutzmaßnahmen für Personen ohne empirische Messungen der Arbeitssituationen vor Ort ermöglichen.

Den rechnerischen Verfahren, die sich vor dem Hintergrund verschiedener (gesetzlicher) Rahmenbedingungen und Anforderungen unterscheiden (vgl. Kap. 2.3), liegen voneinander abweichende Strategien und prinzipielle Modellvorstellungen zu Grunde, die mathematische Formulierungen beschreiben. Diese beruhen aufgrund ihrer unterschiedlichen Zielstellung auf verschiedenen Grundannahmen, die zur Betrachtung die jeweils relevanten Vorgänge vereinfachen. Darüber hinaus bestehen Differenzen in den zu berücksichtigenden Vorgängen und der zugehörigen Erfassung von Stoff-, Umgebungs- und weiteren Randbedingungen.

Als Grundlage einer Analyse zur interdisziplinären Verwendung und Verknüpfung von Modellen zu einem rechnerischen Gesamtverfahren ist die Darstellung der prinzipiellen Stofftransportvorgänge sowie der einzelnen Methoden bzw. Modellkonzepte erforderlich. Insbesondere müssen

- die betrachtungsspezifischen Modellansätze und Annahmen,
- die berücksichtigten physikalischen Phänomene sowie
- die jeweiligen Anwendungsbereiche und -grenzen samt erforderlicher Parameter

aufgezeigt werden. Auf diesen Erläuterungen beruhen die im weiteren Verlauf anzustellenden Überlegungen.

Eine Auswahl bekannter und in der Praxis des Arbeitsschutzes und des Brandschutzes sowie aus weiteren Disziplinen stammender Modellkonzepte werden durch den Verfasser in der eigenständigen Veröffentlichung "Ausgewählte Berechnungsmodelle zur Beschreibung von Gefahrstoffexpositionen an Arbeitsplätzen" samt Ergänzungsdokument [14, 15] aufgeführt und zusammenfassend erläutert. Beispielhaft werden die konzeptionellen Anlagen und Rahmenbedingungen bzw. Anwendungsgrenzen unterschiedlicher Emissions- und Ausbreitungsmodelle aufgeführt. Aus der Disziplin des Brandschutzingenieurwesens wird auf grundlegende Handrechenverfahren sowie die grundsätzlichen Konzepte

- brandschutztechnischer Zonenmodelle am Beispiel des Modells "CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, Version 6" [64, 65] sowie

- brandschutztechnischer Feldmodelle am Beispiel des Modells “FDS - Fire Dynamics Simulator, Version 5⁶¹”[11, 12, 66, 67]

eingegangen. Beide Modelle werden durch das National Institute of Standards and Technology, USA (NIST) als anerkannte Forschungseinrichtung veröffentlicht, gepflegt und weiterentwickelt. Aufgrund der in [14, 15] erfolgten Zusammenfassung wird an dieser Stelle auf eine inhaltliche Wiederholung der Modellbeschreibungen verzichtet und für die weitere Arbeit auf diese Darstellung explizit verwiesen.

Im Überblick der rechnerischen Modelle und Verfahren, die sich mit der Ermittlung und Bewertung von Gefahrstoff-Expositionen Beschäftigter⁶² befassen, ist festzustellen, dass bisher kein universelles und geschlossenes Modell existiert. Vielmehr sind alle Modelle vor dem Hintergrund verschiedener Ausrichtungen und Anwendungsgrenzen konzipiert, die eine Verwendung in bestimmten Bereichen zulassen oder ausschließen. Soll ein Modell konkret Anwendung finden, so muss dabei auch überprüft werden, ob der entsprechende Anwendungsbereich erfasst wird und plausible Ansätze verwendet werden.

Die verschiedenen Modelle beziehen, je nach Ausrichtung, unterschiedliche physikalische und empirische Parameter ein, die im jeweiligen Ansatz erforderlich sind. Es bleibt jedoch offen, inwieweit die für einen physikalischen Vorgang relevanten Parameter, die die entstehenden Massentransporte charakterisieren, abgebildet und erfasst werden.

Neben der Verwendung verschiedener Konzepte und verbundener Parameter unterscheiden sich die dargelegten Modelle maßgeblich in der Art der Größen, die in die Berechnungen eingehen. Einige Modelle benötigen zur Anwendung lediglich “einfach” zu ermittelnde Stoff-, Verfahrens- oder Umgebungsgrößen. Andere Modelle beruhen dagegen auf einer Vielzahl an Parametern, die nicht unmittelbar aus Literatur- oder Messwerten abzuleiten sind. Eine Anwendbarkeit steht für beide Modelltypen daher gleichermaßen vor dem Hintergrund der Genauigkeit der Ergebnisse in Anbetracht angenommener bzw. abgeleiteter Eingangswerte infrage und muss im Hinblick einer realitätsgetreuen Anwendung weiter untersucht werden.

Die vorhandenen Modelle, die im Rahmen von Betrachtungen des Arbeitsschutzes zum Einsatz kommen können, sind aufgrund der jeweiligen Anwendungsgrenzen in Verbindung mit der bisherigen Verwendung kritisch zu betrachten. Die Ableitung eines Gesamtverfahrens, wie es im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgesehen ist, und die Nutzbarkeit in der betrieblichen Praxis erfordern weitere Überprüfungen der Verfahren: Zur jeweiligen Einbindung ist die Klärung notwendig, ob charakteristische Parameter der einbezogenen Stofftransportvorgänge in die Modelle eingehen (vgl. Kapitel 4). Die Verknüpfung verschiedener Ansätze ist nur möglich, wenn geeignete Schnittstellen in Form von miteinander korrespondierenden (Zwischen-) Ergebnissen und Eingangsparametern - insbesondere der Schritte zur Berechnung der Stoffemission sowie der luftgebundenen Ausbreitung - vorliegen. Voraussetzung des betrieblichen Einsatzes ist die Feststellung der Validität und mit welcher Genauigkeit Ergebnisse im Rahmen der jeweiligen Anwendungsgrenzen berechnet werden (vgl. Kapitel 6), um den Anforderungen der GefStoffV (vgl. Kap. 2.1.4) gerecht zu werden.

⁶¹ Das Modell FDS ist mittlerweile bereits als Version 6 veröffentlicht und mit verschiedenen Testfällen validiert worden. Da einerseits in der vorliegenden Arbeit jedoch grundsätzliche konzeptionelle, an ausgewählten Modellbeispielen dargestellte Untersuchungen dargestellt werden, andererseits zum Zeitpunkt der Erstellung noch keine umfangreiche Erfahrungen zu dieser Version (und ggf. noch bestehenden Fehlern) bestehen, wird auf Version 5 Bezug genommen.

⁶² Weitere Modellkonzepte sind z.B. in [9, 68, 69] zu finden. Die jeweiligen Verfahren beruhen jedoch auf ähnlichen prinzipiellen konzeptionellen Ansätzen.

Kapitel 4

Beurteilung von Modellen anhand stoffbezogener Anforderungen

Die Stofftransportvorgänge der Emission und Ausbreitung lassen sich physikalisch-theoretisch durch charakteristische Parameter⁶³ als Grundgrößen darstellen (z.B. Sättigungsdampfdruck bei der Flüssigkeitsverdunstung). Diese sind für die unterschiedlichen Transportvorgänge tabellarisch in Anhang A aufgeführt. Eine detaillierte Analyse der Vorgänge bzw. deren Abbildung in mathematischen Gleichungen - insbesondere der auftretenden Massenströme als Emissions- und Ausbreitungsmerkmal - ist nur möglich, wenn die charakteristischen Parameter in den Betrachtungen berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung kann direkt, d.h. unter Verwendung des Parameters im Berechnungsvorgang selbst, oder indirekt durch Charakterisierung mit anderen (Hilfs-) Größen erfolgen.

Werden Modelle zur mathematischen Beschreibung eines physikalischen Vorgangs abgeleitet, hängt die Genauigkeit und Realitätstreue der Ergebnisse u.a. von der Erfassung und Einbindung der charakteristischen Parameter durch geeignete Eingangsgrößen⁶⁴ in die jeweiligen Berechnungsansätze ab. Die mit der mathematischen Darstellung einhergehenden Vereinfachungen und Annahmen stellen ebenfalls eine mögliche Ursache für Abweichungen der Resultate dar. Zur Untersuchung stoffbedingter Gefährdungen von Beschäftigten in Arbeitsräumen müssen stoffspezifische⁶⁵ und tätigkeitsspezifische⁶⁶ Eigenschaften sowie Größen des allgemeinen Arbeitsumfelds⁶⁷ berücksichtigt werden, um eine realitätsgetreue Abschätzung durchzuführen [9, 70].

Vor der Konzeption eines Gesamtverfahrens zur Beurteilung stoffspezifischer Gefährdungen wird aufgrund des Ziels möglichst genauer bzw. realitätsnaher Berechnungsergebnisse eine Analyse und Bewertung der Modelle durchgeführt, ob die jeweiligen charakteristischen Parameter des Stofftransports geeignet einbezogen werden und Schnittstellen der Modelle bestehen. Das Kapitel stellt dazu einen Soll-Ist-Vergleich zwischen Modell und Transportparametern auf. Ebenfalls werden die tätigkeits- und raumspezifischen Parameter, die für eine Bewertung der Arbeitssituation erforderlich sind, einbezogen. Dazu werden tabellarische Gegenüberstellungen der Eingangsgrößen und -bedingungen der Modellkonzepte mit den in Anhang A aufgeführten cha-

⁶³ Physikalische Größen und Parameter, die den Verlauf und die Bedingungen des Stofftransports als funktionalen Zusammenhang beschreiben und die Vorgänge untereinander abgrenzen.

⁶⁴ Einzelwert (z.B. einer Rahmenbedingung), die ein Modell zur Durchführung von Berechnungen benötigt.

⁶⁵ Charakterisierung der Emission und Ausbreitung durch Stoffeigenschaften ohne Bezug auf konkrete Einsatz- und Umgebungsbedingungen.

⁶⁶ Charakterisierung der Beeinflussung der Emission und Ausbreitung durch Arbeitsorganisation und Verwendungsbedingungen eines Stoffes.

⁶⁷ Beeinflussung der Emission und Ausbreitung durch globale Verhältnisse des betrachteten Raumes sowie thermodynamische Umgebungsbedingungen.

rakteristischen Parametern der relevanten Vorgänge vorgenommen. Um eine Beurteilung hinsichtlich der weiteren Verwendbarkeit zur Ableitung eines rechnerischen Gesamtverfahrens zur stoffspezifischen Gefährdungsbeurteilung vorzunehmen, werden weiterhin Vor- und Nachteile der Modelle einbezogen und Stärken bzw. Schwächen (bspw. aufgrund der Wiedergabe charakteristischer Parameter) identifiziert. Der methodische Vergleich erfolgt unter Berücksichtigung folgender Aspekte, die jeweiligen tabellarischen Zusammenfassungen führt Anhang B auf:

- Physikalische Vorgänge:
Vorgänge, die über die Modellansätze beschrieben werden sollen,
- Charakteristische Parameter:
Mathematisch abzubildende Größen der physikalischen Betrachtung der Vorgänge (vgl. Anhang A),
- Modellspezifische Eingangsgrößen:
Zuordnung einbezogener Größen der Modellansätze zu charakteristischen Parametern,
- Soll-Ist-Vergleich:
Erläuterung und Bewertung der erfolgten bzw. nicht erfolgten Wiedergabe charakteristischer Parameter durch modellspezifische Eingangsgrößen.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Gesamtverfahren zur Gefährdungsbeurteilung stellt ein prinzipielles Konzept dar. Die in der Veröffentlichung "Ausgewählte Berechnungsmodelle zur Beschreibung von Gefahrstoffexpositionen an Arbeitsplätzen" samt Ergänzungsdokument [14, 15] aufgeführten Modelle zur Stofffreisetzung werden daher beispielhaft untersucht. Die anschließende Stoffausbreitung soll mit Hilfe validierter Brandschutzingenieurmodelle abgeschätzt werden, so dass die Gegenüberstellungen diese Modelle ebenfalls beinhalten. Weiterhin wird das Konzept des Arbeitssystems daraufhin beurteilt, ob die zur weiteren Berücksichtigung erforderlichen Konkretisierungen der Arbeitssystemelemente vollständig eingegliedert werden können. Diese Untersuchung des Arbeitssystems erfolgt (entgegen der späteren Konzeption des Verfahrens) bewusst zum Abschluss, da die Konkretisierungen ggf. Bezug auf Parameter der zuvor diskutierten Emissions- und Ausbreitungsmodelle nehmen.

Die an dieser Stelle dargelegten Untersuchungen stellen die methodische Grundlage für die spätere Ableitung des rechnerischen Gesamtverfahrens dar (vgl. Kap. 5).

4.1 Modelle zur Stoffemission

Die Stofffreisetzung als Gas in die Luft am Arbeitsplatz kann durch verschiedene Stofftransportvorgänge erfolgen, deren Auftreten u.a. vom ursprünglichen Aggregatzustand abhängt. Die verschiedenen im Arbeitsschutz Verwendung findenden Modellkonzepte beziehen unterschiedliche Vorgänge in die jeweiligen Berechnungen ein. Ansätze des Brandschutzes legen den Fokus auf die Abbildung bzw. Ermittlung der brandbedingten Wärmefreisetzung. Die nachfolgende Beurteilung der Verwendung verschiedener Arbeits- und Brandschutzmodelle (bzw. entsprechender Untermodelle computerbasierter Rechenverfahren) erfolgt aus dem Blickwinkel des Arbeitsschutzes.

4.1.1 Unmittelbare Abschätzung von Emissionen

Für alle Ausbreitungsbetrachtungen können die Eingangsparameter, welche die Stoffemission charakterisieren, modellspezifisch sowie situations- und wissensabhängig angenommen werden. Bei Verwendung angenommener Werte entfällt die Notwendigkeit von Berechnungen des zeitabhängigen Emissionsverlaufes. Die Annahmen resultieren bspw. aus verfügbaren Messwerten

oder Erfahrungswerten. Es wird unmittelbar vom Gaszustand des Stoffs ohne Beschreibung eines möglichen Phasenübergangs ausgegangen.

Die unterstellten Eingangsgrößen sind nicht an einen physikalischen Vorgang gebunden, sondern orientieren sich vielmehr an den erforderlichen Größen zur Parametrisierung des Verwendung findenden Ausbreitungsmodells. Vorgaben zur Emission von Gasen erfordern Annahmen zu Volumen- oder Massenstrom und mit diesen zusammenhängende Größen (vgl. [15], Gl. 1 und [5, 71]) sowie ggf. zur Charakteristik der Emissionsöffnung. Die abzuschätzenden Eingangswerte bilden eine unmittelbare Schnittstelle zum Ausbreitungsmodell, so dass neben den grundlegenden strömungsmechanischen Größen keine charakteristischen Parameter zu beachten sind. Die unmittelbare Vorgabe ohne physikalischen Hintergrund macht eine Bewertung hinsichtlich der weiteren Verwendbarkeit nicht erforderlich⁶⁸. Vielmehr ist in der praktischen Anwendung für realitätsnahe Ergebnisse des Gesamtverfahrens sicherzustellen, dass die einbezogenen Größen den tatsächlich zu erwartenden Emissionsbedingungen entsprechen bzw. eine möglichst genaue Abschätzung darstellen. Vorgaben zur Stoffemission als unmittelbare Verknüpfung zu Ausbreitungsrechnungen erfolgen insbesondere dann, wenn die entsprechenden Parameter aus anderen - nicht rechnerischen - Betrachtungen vorliegen. Die Zwischen- und Endergebnisse sind vor dem Hintergrund der ggf. unsicheren Eingangsparameter zu untersuchen und zu bewerten.

4.1.2 Modell zur Gas-Emission aus Behältern

Das Modell zur Gas-Emission aus Behältern beruht auf Formulierungen zum Ausstrom von Fluiden durch Öffnungen, die fallspezifisch (z.B. auf den Aggregatzustand) angepasst sind (vgl. [14, 15, 69, 72]). Ein Vergleich der charakteristischen Parameter für den Fall der strömungsmechanischen Emission von Gasen aus Behältern (vgl. Anhang A, Tab. A.1) zu den Eingangswerten des Modellkonzepts samt Unterscheidung des über- bzw. unterkritischen Falls ist in Tab. B.1 des Anhangs B dargestellt.

Aus dem tabellarischen Vergleich wird ersichtlich, dass das Modell eine Vielzahl der charakteristischen Parameter der entsprechenden physikalischen Vorgänge berücksichtigt. Dabei findet insbesondere die Öffnungscharakteristik sowie die resultierende Beeinflussung des Strömungsverhaltens Eingang in die Betrachtungen. Diese greifen hierbei auf empirisch bekannte bzw. abzuschätzende Strömungsbeiwerte zurück, die ggf. erweiterte Betrachtungen erforderlich machen. Darüber hinaus beruhen die Ansätze auf theoretisch bekannten Verhältnissen mitsamt der entsprechenden mathematischen Umsetzung. Die Strömungsgeschwindigkeit wird entsprechend der Bernoulli-Gleichung aus zusammenhängenden strömungsmechanischen Parametern abgeschätzt (vgl. [73]).

Prinzipiell besteht die Möglichkeit, das Modell zur Gasemission aus Behältern im Rahmen eines Gesamtkonzepts mit der Verknüpfung über einen ermittelten Volumen- bzw. Massenstrom als Ergebnisgröße einzubinden. Dabei werden die charakteristischen Parameter weitreichend wiedergegeben bzw. in den Betrachtungen berücksichtigt. Weiterhin sind die verwendeten Eingangsgrößen leicht zu identifizieren oder abzuschätzen, so dass von einer hinreichend genauen Berechnung auszugehen ist.

Da das Modell nicht unmittelbar die Entwicklung des hydrodynamischen Drucks sowie der einhergehenden Veränderung der Gasdichte innerhalb des Behälters, die für die Strömungsgeschwindigkeit im Vergleich mit dem Umgebungsdruck verantwortlich sind und mit fortschreitender Entleerung absinken, in die Betrachtungen einbezieht, besteht zunächst keine Zeitabhängigkeit. Um diese einzubinden, werden die zeitliche Verknüpfung bzw. Rückrechnungen auf Druck-

⁶⁸ Auf die tabellarische Darstellung des Vergleichs mit charakteristischen Parametern wird daher an dieser Stelle verzichtet.

und Dichteverhältnisse in Abhängigkeit zum Betrachtungszeitpunkt und der dynamischen Entwicklung von Massen- bzw. Volumenstrom erforderlich. Eine Möglichkeit zur Abschätzung für Gase bezieht die ideale Gasgleichung ein. Dementsprechend sind für eine vollständige Einbindung des Modells konzeptionelle Erweiterungen notwendig, die auf zeitabhängige Betrachtungen abzielen und ggf. ergänzt werden müssen.

4.1.3 Modell des Sättigungsdampfdrucks (SVP-Modell)

Das SVP⁶⁹-Modell dient der rechnerischen Darstellung der Verdunstung aus Oberflächen bzw. Lachen. Dazu erfolgt die Annahme einer konstanten Größe der Oberfläche, aus der eine Verdunstung bis hin zum Erreichen der Dampfsättigungskonzentration eines Stoffes oder Gemisches erfolgt, wobei konzeptionell nicht hinsichtlich der Stoffzusammensetzung unterschieden wird (vgl. [14, 15, 68]). Für den methodischen Abgleich finden die charakteristischen Parameter des Verdunstungsvorgangs aus Oberflächen aus Tab. A.2, Anhang A, Verwendung; der tabellarische Vergleich findet sich in Anhang B, Tab. B.2.

Das Konzept des SVP-Modells berücksichtigt als Eingangsgrößen lediglich zwei charakteristische Parameter, von denen auf die maximal mögliche Stoffkonzentration eines verdunstenden Stoffes in der Luft des Raumes unter stationären Bedingungen geschlossen werden soll. Das Ergebnis schätzt dementsprechend unmittelbar eine potentielle Luftkonzentration (Worst-Case-Abschätzung) ab, die als gleichmäßige Verteilung angenommen wird. Anhand der verwendeten Größen erfolgt lediglich eine theoretische Abschätzung, die keine Parameter des Raumes oder der konkret betrachteten Tätigkeit einbindet.

Das SVP-Modell eignet sich aufgrund der fehlenden Erfassung grundlegender tätigkeits- und umgebungsspezifischer Rahmenbedingungen sowie der unmittelbaren Berechnung einer Luftkonzentration nicht zur weiteren Berücksichtigung im Rahmen eines Gesamtverfahrens. Es zeigt weder die Möglichkeit einer umfassenden Berücksichtigung auftretender Verhältnisse noch einen geeigneten Verknüpfungspunkt zu angeschlossenen Stoffausbreitungsberechnungen auf. Darüber hinaus ist nicht davon auszugehen, dass anhand der groben Modellkonzeption realistische Ergebnisse erzielt werden können. Die ermittelte Luftkonzentration kann weiterhin nicht in die Ausbreitungsberechnungen als Eingangswert übernommen werden.

4.1.4 Modell der vollständigen Verdunstung (CEM-Modell)

Das CEM⁷⁰Modell berechnet die Stoffkonzentration, die sich infolge einer vollständigen Verdunstung eines Flüssigkeitsvolumens in einem nicht belüfteten Raum bei gleichbleibender Temperatur einstellt. Es geht davon aus, dass kein Phasengleichgewicht auftritt und somit ein vollständiger Phasenübergang der Flüssigkeit bei ausreichend langer Betrachtungsdauer erfolgt. Es handelt sich somit um eine Worst-Case-Abschätzung der maximal auftretenden Stoffkonzentration in der Raumluft (vgl. [14, 15, 68]). Die Gegenüberstellung der Eingangsgrößen mit den charakteristischen Parametern der Oberflächenverdunstung (vgl. Anhang A, Tab. A.2) erfolgt in Tab. B.3 des Anhangs B.

Das CEM-Modell als Abschätzung der gemittelten, maximalen Konzentration innerhalb eines Raumes infolge der vollständigen Verdunstung beruht auf der idealen Gasgleichung ohne weitreichende Einbeziehung tätigkeits- oder umgebungsspezifischer Parameter. Dabei wird weiterhin von einer ausreichenden Zeitspanne ausgegangen, so dass stationäre Bedingungen Berücksichtigung finden. Dementsprechend erfolgt im Rahmen des Modellansatzes die Beachtung einzelner

⁶⁹ Aus dem Englischen: Saturation Vapour Pressure Model.

⁷⁰ Aus dem Englischen: Complete Evaporation Model.

charakteristischer Parameter, wesentliche Bedingungen zur Darstellung zeitabhängiger Vorgänge bzw. Änderungen der einflussnehmenden Parameter bleiben jedoch unberücksichtigt. Die Darstellung zeitbezogener Verläufe ist nicht möglich.

Das CEM-Modell bildet eine Worst-Case-Abschätzung der potentiellen Konzentration innerhalb des Betrachtungsraumes, die auf bekannten bzw. einfach zu erfassenden Eingangsgrößen beruht. Demgegenüber werden maßgebliche charakteristische Parameter der Verdunstung von Flüssigkeiten aus Oberflächen nicht in die Betrachtungen einbezogen, wobei lediglich Untersuchungen zu stationären Bedingungen erfolgen. Darüber hinaus stellt die Ergebnisgröße eine unmittelbare Luftkonzentration dar, die aufgrund der Bildung als raumbezogener Mittelwert als nicht realitätsgetreu erscheint und nicht in das Ausbreitungsmodell überführt werden kann. Dementsprechend ist das CEM-Modell nicht zur weiteren Verwendung innerhalb eines Gesamtverfahrens geeignet, eine weitere Berücksichtigung erfolgt nicht.

4.1.5 Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu

Zur numerischen Betrachtung der Stoffemission als Folge der Verdunstung unter Einfluss eines Luftstromes oberhalb der Oberfläche bei Geschwindigkeiten zwischen 0,00 m/s und 6,70 m/s ist das Modell nach Mackay und Matsugu abgeleitet worden. Es finden lediglich reine Stoffe - keine Stoffgemische - Berücksichtigung. Dementsprechend nimmt die Konzeption den unmittelbaren Weitertransport des emittierten Stoffmassenstroms an, so dass eine Verknüpfung zu den vorliegenden Umgebungsbedingungen bestehen muss (vgl. [14, 15, 74, 75]).

Tab. B.4, Anhang B führt den Abgleich der charakteristischen Parameter der Verdunstung aus Oberflächen (vgl. Anhang A, Tab. A.2) mit den modellspezifischen Eingangsgrößen des Verdunstungsmodells nach Mackay und Matsugu auf. Dabei werden die Eingangsgrößen, die innerhalb des Ansatzes über Zwischenparameter - insbesondere durch den Stofftransportkoeffizienten k - zusammengefasst werden, einzeln den charakteristischen Parametern zugeordnet, um deren Berücksichtigung zu verdeutlichen.

Das Verdunstungsmodell für reine Stoffe nach Mackay und Matsugu basiert auf empirischen Betrachtungen, bindet dennoch über unterschiedliche Randbetrachtungen und als Hilfsgrößen zusammengefasste Bedingungen eine Vielzahl der charakteristischen Parameter der Verdunstung ein. Infolge der ursprünglichen experimentellen Untersuchungen bestehen Hilfsfaktoren, über die eine Korrelation der Ergebnisse auf die Untersuchungsbedingungen und die berücksichtigten Stoffe erfolgt. Die Ergebnisgröße des flächenbezogenen Emissions-Massenstroms stellt Bezüge zur betrachteten Oberfläche und den Einflüssen der oberhalb vorherrschenden Strömungsbedingungen der Umgebungsluft her.

Insbesondere über die Ermittlung eines flächenbezogenen Emissions-Massenstroms als Ergebnisgröße kann eine Einbindung des Modells in ein Gesamtverfahren als Untermodell zur Stoffemission erfolgen. Dabei bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass der Modellansatz auf der experimentellen Untersuchung einer begrenzten Stoffanzahl und -versuchen und unter eingeschränkten Bedingungen - insbesondere einem engen Bereich von Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Flüssigkeits-Oberfläche im Freien - beruht, die den Verwendungsbereich vor dem Hintergrund gesicherter Erkenntnisse begrenzen. Dementsprechend sind im Zuge der Einbindung weitere (Validierungs-) Betrachtungen erforderlich, die eine allgemeine Verwendbarkeit des Modells überprüfen. Der Anwendungsbereich muss weiterhin bei der Auswahl des Modells für die Betrachtungen unter Berücksichtigung der Bedingungen der konkreten Arbeitssituation Beachtung finden. Darüber hinaus erfordert die Erfassung zeitabhängiger Veränderungen eine weitergehende Einbindung zur Berücksichtigung zeitlich variabler Umgebungsbedingungen.

4.1.6 Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling

Ähnlich dem Modell nach Mackay und Matsugu bezieht das Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling den Phasenübergang aus Flüssigkeitsflächen unter Einwirkung einer Luftströmung über der Oberfläche (mit Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,20 m/s und 0,70 m/s) ein. Dadurch wird eine unmittelbare Stoffausbreitung in der Umgebung unterstellt. Die Ableitung des Modells ist mit Bezug auf Stoffgemische erfolgt, Reinstoffe können jedoch ebenfalls betrachtet werden (vgl. [14, 15, 76]). Aufgrund der Verwendung anderer Eingangsparameter führt Anhang B, Tab. B.5 die Gegenüberstellung des Modells zu den charakteristischen Parametern der Verdunstung aus Anhang A, Tab. A.2 als Abgrenzung zum Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu auf.

Ähnlich wie das Modell nach Mackay und Matsugu beruht das Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling auf empirischen Untersuchungen, die jedoch auf Reinstoffe und Stoffgemische ausgerichtet wurden. Das Modell besitzt somit grundsätzlich Gültigkeit für wenige Verbindungen unter definierten Umgebungsbedingungen (insbesondere Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Oberfläche). Neben einer Vielzahl der charakteristischen Parameter der Verdunstung gehen gleichsam Korrelationsfaktoren in die Berechnungen ein, die aus den Untersuchungen abgeleitet wurden und somit den Anwendungsbereich beschränken.

Das Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling kann gleichermaßen in ein Gesamtverfahren als Untermodell zur Ermittlung des Emissions-Massenstroms durch Verdunstungsvorgänge einbezogen werden. Es ist auf Reinstoffe und Stoffgemische bzw. entsprechende Komponenten ausgerichtet und stellt somit eine Ergänzung des Berechnungskonzeptes nach Mackay und Matsugu dar. Es bleibt dabei zu klären, inwiefern eine verallgemeinernde Berücksichtigung in Verbindung mit den ursprünglichen Anwendungsbedingungen erfolgen kann. Weiterhin ist die Aufstellung einer Systematik notwendig, die eine zeitabhängige Ermittlung der Ergebnisgröße des Emissions-Massenstroms ermöglicht, so dass dieser als Verknüpfungspunkt für weitergehende Betrachtungen der anschließenden Stoffausbreitung in der Luft des Arbeitsraumes berücksichtigt werden kann. Dementsprechend muss ebenfalls eine zielorientierte Auswahl des Modells innerhalb des Gesamtverfahrens sowie ggf. die Betrachtung mehrerer Berechnungsschritte erfolgen.

4.1.7 Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell

Über die Verdunstung hinaus kann der verwandte und im Hinblick auf eine fortschreitende Temperatursteigerung in Flüssigkeiten anschließende Vorgang der Verdampfung über ein theoretisches Modell beschrieben werden. Dieses erfasst den aus einer konstant bleibenden Flüssigkeitsoberfläche resultierenden Emissions-Massenstrom auf Grundlage der allgemeinen Wärmetheorie. Dabei werden die Wärmeübertragungen aus der Umgebung berücksichtigt, der Konzentrationsverlauf in der Umgebungsatmosphäre bleibt jedoch unbeachtet. Neben dem Vorgang der Verdampfung betrachtet das Modell gleichermaßen den Sonderfall der Sublimation, die einen unmittelbaren Phasenübergang von Feststoffen in den Gaszustand beschreibt, in dem die entsprechende Sublimationsenthalpie in die Formulierungen einbezogen wird (vgl. [14, 15, 71, 77]). Obwohl die Verdampfung und die Sublimation gleichermaßen mittels Wärmetheorie betrachtet werden können, beruhen die physikalischen Vorgänge auf unterschiedlichen charakteristischen Parametern, die Anhang A, Tab. A.3 und Tab. A.4 auführen. Dementsprechend erfolgt der in Anhang B, Tab. B.6 dargestellte Vergleich mit den Eingangsgrößen des Modells nach Vorgängen differenziert.

Das Modell zur Ermittlung des Emissions-Massenstroms aufgrund von Verdampfung bzw. Sublimation berücksichtigt lediglich eine geringe Anzahl der bestehenden charakteristischen Parame-

ter dieser Vorgänge. Insbesondere erfolgt kein Bezug auf Größen, welche die tatsächlichen Umgebungsbedingungen - mit Ausnahme der auf die Stoffoberfläche einwirkenden Wärmestromdichte - umschreiben, so dass der Stofftransportvorgang singular betrachtet wird. Ebenso bleiben Vorgänge, die vor der Erreichung des Verdampfungs- bzw. Sublimationszustandes (bspw. vorangestellte Verdunstung einer Flüssigkeit mit Übergang in die Verdampfung) durchlaufen werden, und der Einfluss des anschließenden Stofftransports in der Umgebungsatmosphäre unberücksichtigt.

Trotz der eingeschränkten Wiedergabe charakteristischer Parameter besteht grundsätzlich die Möglichkeit zur Einbindung des theoretischen Verdampfungs- und Sublimationsmodells als Teilbetrachtung eines rechnerischen Gesamtverfahrens. Aufgrund der theoretischen Ableitung der Formulierungen ohne empirische Korrekturfaktoren, die die Anwendbarkeit begrenzen, stellt das Modell ein stark vereinfachende Abschätzung dar. Weitere Abhängigkeiten, vor allem einwirkende thermodynamische Umgebungsbedingungen sowie die Zeitabhängigkeit der Vorgänge, können über den Eingangparameter der zeitabhängigen Wärmestromdichte Berücksichtigung finden. Dazu ist jedoch ggf. eine weitreichende Verknüpfung mit ergänzenden Betrachtungen erforderlich, die sowohl Vorgänge bis zur Erreichung des Verdampfungs- bzw. Sublimationsvorgangs (z.B. im Abgleich zwischen stoffspezifischen Kenngrößen und tatsächlich vorliegenden Eigenschaften) als auch die auftretenden Wärmestromdichten zeitabhängig beschreiben. Ob eine Verwendung realitätsgetreue Ergebnisse erbringen kann, ist weiterhin vor dem Hintergrund des vernachlässigten Einflusses der angeschlossenen Stoffausbreitung zu überprüfen.

4.1.8 Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells CFAST (Zonenmodell)

Als Anwendungsbeispiel brandschutztechnischer Zonenmodelle besteht mit dem Modell CFAST die Möglichkeit, Rauch-Massenströme innerhalb des Plumes⁷¹ sowie die Interaktion der verschiedenen Schichten, über mehrere Räume hinweg, rechnerisch zu ermitteln. Die Berechnung der entstehenden Massenströme basiert auf theoretisch abgeleiteten und ggf. empirisch angepassten Plume-Formulierungen und zieht Angaben eines zu definierenden Brandszenarios heran. Auf dieser Grundlage wird ein orts- bzw. aufstiegshöhenbezogener Rauchgasmassenstrom ermittelt [14, 15, 64, 65].

Das Modell bietet die Möglichkeit, für den Rauchgasmassenstrom im Emissionspunkt Massenanteile der enthaltenen Komponenten vorzugeben, die im weiteren Verlauf die Grundlage für Konzentrationsberechnungen bilden. Die Angaben konkretisieren die Verbrennungsreaktion und definieren die stoff- bzw. komponentenspezifische Emission von Verbrennungsprodukten zur weiteren Berücksichtigung. Ergänzende Untermodelle, bspw. zur Verdampfung von Komponenten aus Stoffen, bestehen nicht. Ebenso verfügt das Modell über keine Funktion zur Charakterisierung einer Stofffreisetzung ohne Bindung an ein Brandereignis.

Die Berechnungsalgorithmen sind auf die Untersuchung von Bedingungen eines Brandes ausgerichtet. Eingaben zur Stoffemission dienen der Beschreibung des Rauchgasmassenstroms innerhalb des Plumes sowie der volumenbezogenen, gemittelten Konzentrationsberechnung in der Rauchsicht bzw. raucharmen Schicht. Der emittierte Rauchgasmassenstrom wird weiterhin nicht als Eingabeparameter vorgegeben, sondern durch das Modell aus den Rahmenbedingungen des Brandszenarios (insbesondere aus der Wärmefreisetzungsrate) mittels brandspezifischer Quellterme ermittelt. Das Untermodell zur Verbrennungsmodellierung bzw. Verbrennungsproduktfreisetzung kann daher keine allgemeine Berücksichtigung im Rahmen eines stoffbezogenen

⁷¹ Thermisch bedingte, aufwärts gerichtete Rauchströmung über der Brandfläche, in der der Massenstrom durch turbulent eingemischte Umgebungsluft zunimmt und sich gleichzeitig Temperatur und Geschwindigkeit verringern.

nen, nicht auf ein Brandereignis ausgerichteten Gesamtverfahrens finden. Durch die konzepttypische Bindung der Stoffemission an Brandereignisse, die nicht im Fokus der Arbeitsschutz-Betrachtungen stehen, und die einhergehende (zwingende) Unterstellung eines Brandes ist kein Verknüpfungspunkt zu anderen, vorgelagerten Emissionsbetrachtungen anderer Modellansätze vorhanden. Die Darstellung der Freisetzung von Gefahrstoffen in einen Arbeitsraum ist somit nicht gegeben. Das geplante Gesamtverfahren soll unabhängig von möglichen Brandereignissen sein, so dass eine weitere Einbindung brandschutztechnischer Zonenmodelle bereits an dieser Stelle - auch für die Berechnung der Stoffausbreitung - ausgeschlossen ist⁷².

4.1.9 Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells FDS (Feldmodell)

Das Brandschutzingenieurmodell FDS als programmatische Umsetzung des Feldmodell-Konzepts bietet die grundlegende Möglichkeit der Berechnung der freien Emission und Ausbreitung von Verbrennungsprodukten sowie weiterer Komponenten innerhalb von Räumen. Zur Darstellung der Freisetzung können Massenanteile von Stoffen bzw. im emittierten Brandrauch enthaltene Komponenten definiert werden, die als Annahmen in die weiteren Betrachtungen eingehen. Die Option steht sowohl für das eigentliche Brandereignis als auch ohne Bindung an einen Brand über Öffnungsflächen zur Verfügung, deren Parametrisierung die strömungsmechanischen Rahmenbedingungen umfasst. Dies entspricht der in Kap. 4.1.1 erläuterten Systematik der unmittelbaren Vorgabe der Stoffemission. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Berechnung der Verdunstung bzw. Verdampfung sowie der Pyrolyse von Komponenten aus Feststoffen und Flüssigkeiten, wozu die Betrachtungen die thermodynamischen Umgebungsbedingungen einbeziehen [11, 12, 14, 15, 66, 67].

Die Vorgabe von Massenanteilen der Verbrennungsreaktion sowie des daraus entstehenden Rauchgasmassenstroms ist - ebenso wie im brandschutztechnischen Zonenmodell CFAST - an die Unterstellung eines Brandes geknüpft. Dabei erfolgt die Erfassung der gesamten verbrannten Stoffmasse, die sich auf die enthaltenen Komponenten über entsprechende Massenanteile verteilt. Aufgrund der Ausrichtung auf Brandereignisse besteht somit für dieses Untermodell keine allgemeine Verwendbarkeit in einem stoffbezogenen Gesamtverfahren des Arbeitsschutzes, das Verbrennungsreaktionen unberücksichtigt lassen soll. Auf den Vergleich mit charakteristischen Parametern wird an dieser Stelle verzichtet.

Das Untermodell zur rechnerischen Ermittlung des Emissions-Massenstroms aus Verdunstungs- und Verdampfungs- bzw. Pyrolysevorgängen bezieht umfangreiche Eingangsgrößen der thermodynamischen Stoffeigenschaften, die entsprechend definiert werden müssen, sowie der Umgebungsbedingungen ein. Die Berechnungen setzen konzeptionell voraus, dass es sich um die Freisetzung von Brennstoffen handelt, die sich bei Kontakt mit der Umgebungsluft innerhalb eines Kontrollvolumens unmittelbar entzünden. Das Untermodell zur Verdampfung und Verdunstung bzw. Pyrolyse dient somit der Berechnung der Wärmefreisetzung infolge thermischer Rückkopplungseffekte während eines Brandes. Dementsprechend erfolgt eine Abschätzung der Verbrennungsreaktion, deren Verlauf über die Stöchiometrie des in die Gasphase umgesetzten Brennstoffes sowie des vorhandenen Luftsauerstoffes gesteuert wird. Die allgemeine Berechnung der Stoffemission aus den entsprechenden Vorgängen ist somit innerhalb des Modells zwar prinzipiell möglich, allerdings zwingend an einen Brand gebunden. Aufgrund der unmittelbar angenommenen Verbrennungsreaktion finden die Untermodelle keine allgemeine Berücksichtigung im Sinne des Arbeitsschutzes. Die Eingliederung in ein Gesamtverfahren ohne die Betrachtung eines Brandereignisses ist somit nicht möglich, so dass gleichermaßen kein Vergleich der

⁷² Auf einen Vergleich zur Charakterisierung der modellbezogenen Einbindung charakteristischer Emissionsparameter wird an dieser Stelle aufgrund des Ausschlusses verzichtet. Zur weiteren Argumentation zur Stoffausbreitung vgl. Kap. 4.2.6.

Unterschied-Parameter mit den charakteristischen Größen der Verdampfung, Verdunstung und Pyrolyse erfolgt.

Abschließend bietet das Modell die Option, Vorgaben zur Emission über Öffnungen anhand unterschiedlicher strömungsmechanischer Parameter in Verbindung mit Stoffeigenschaften der Emission zu treffen. Maßgebliche Parameter, die vorgegeben werden können, sind insbesondere:

- der flächenspezifische Emissions-Massenstrom in $[kg/(s m^2)]$ oder Emissions-Volumenstrom in $[m^3/s]$,
- die Anteile enthaltener Stoffe bzw. Komponenten als Massenanteil (Bezug auf emittierten Gesamt-Massenstrom)
- die Emissions- bzw. Öffnungsfläche,
- die Strömungsgeschwindigkeit in der Öffnungsfläche in $[m/s]$ sowie Temperatur bei Emission in $[°C]$,
- verschiedene inhärente Stoffeigenschaften (z.B. Molekulargewicht in $[g/mol]$, Verdampfungsenthalpie in $[kJ/kg]$, Wärmespeicherkapazität $[kJ/(kg K)]$, vgl. [12]).

Auf diese Weise können Stofffreisetzungen in den Betrachtungsraum beschrieben werden, die modellbedingt nicht zwangsweise in Verbindung mit einem Brandereignis stehen. Die Durchführung einer Berechnung setzt nicht zwingend die Definition eines Brandereignisses voraus; durch die generelle Konzeption ist das Modell FDS entgegen brandschutztechnischer Zonenmodelle nicht unmittelbar an eine Verbrennung gekoppelt. Die Möglichkeit zur Charakterisierung emittierter Stoffe mit ihren Stoffeigenschaften bietet eine umfangreiche und detaillierte Beschreibung von Freisetzungsvorgängen mit flächenbezogenen Parametern⁷³.

Mit der Option zur unmittelbaren Vorgabe von Emissionsströmungen sowie der Charakterisierung der enthaltenen Komponenten besteht die Möglichkeit, Stofffreisetzungen in die Berechnungen einzubinden. Dementsprechend kann prinzipiell eine Einbindung des Brandschutzingenieurmodells FDS in ein stoffspezifisches Gesamtverfahren des Arbeitsschutzes erfolgen. Die anderen integrierten Emissionsmodelle zu Verdunstung, Verdampfung und Pyrolyse eignen sich jedoch aufgrund der genannten Einschränkungen nicht zur weiteren Berücksichtigung. Durch die Verwendung des flächenbezogenen Emissions-Massenstroms bzw. -Volumenstroms steht ein Verknüpfungspunkt zu anderweitigen Emissionsmodellen (als vorgelagerte Betrachtungen) zur Verfügung. Die Emissionsbeschreibung dient daher sowohl für Vorgaben zur unmittelbaren Annahme von Emissionsparametern als auch zur Übernahme von Zwischenergebnissen in die angeschlossenen Betrachtungen zur Stoffausbreitung. Im Sinne der Stofffreisetzung kann das Modell FDS in ein Gesamtverfahren integriert werden, für spezifische Stofftransportvorgänge der Emission müssen jedoch Ergänzungen mit weiteren (Emissions-) Modellen vorgenommen werden.

4.1.10 Zusammenfassender Überblick

Aus den in Kap. 4.1.1 bis Kap. 4.1.9 dargelegten Beurteilungen ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten zur weiteren Berücksichtigung der einzelnen Emissionsmodelle in einem Gesamtverfahren. Tab. 4.1 fasst die Beurteilungen je Modell als Überblick zusammen und führt insbesondere vorhandene Schnittstellen und Ansatzpunkte ggf. notwendiger methodischer Erweiterungen auf.

⁷³ Die Vorgaben zur Emission werden ohne weiteren physikalischen Hintergrund eines Stofftransportvorgangs vorgenommen, der Bezug liegt auf strömungsmechanischen Grundparametern. Auf die tabellarische Darstellung eines Vergleichs mit charakteristischen Parametern wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Modell	Vorgang Stofftransport	Wiedergabe charakteristischer Parameter	Schnittstelle Ausbreitungsberechnung	Eignung für Gesamtverfahren
<i>Unmittelbare Abschätzung von Emissionen</i>	pauschale Annahme von Eingangsparametern der Ausbreitungsberechnung	bzw. Abschätzung der Ausbreitungsberechnung	erforderliche Eingangsgrößen Ausbreitungsberechnung	unmittelbare Verwendung, möglichst genaue Abschätzung erforderlich
<i>Modell zur Gas-Emission aus Behältern</i>	druckbedingte Fluid-Emission aus Behältern (hier: Gase)	in weiten Teilen, keine Zeitabhängigkeit	Emissions-Volumen- bzw. Massenstrom	prinzipielle Eignung bei Erweiterung zur Zeitabhängigkeit
<i>SVP-Modell</i>	Verdunstung, pauschale Ausbreitung	gering (weitreichende Vernachlässigung), keine Zeitabhängigkeit	keine	keine Eignung
<i>CEM-Modell</i>	Verdunstung, pauschale Ausbreitung	gering (weitreichende Vernachlässigung), keine Zeitabhängigkeit	keine	keine Eignung
<i>Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu</i>	Verdunstung	in weiten Teilen, keine Zeitabhängigkeit	flächenbezogener Emissions-Massenstrom	prinzipielle Eignung bei Erweiterung zur Zeitabhängigkeit
<i>Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling</i>	Verdunstung	in weiten Teilen, keine Zeitabhängigkeit	Emissions-Massenstrom	prinzipielle Eignung bei Erweiterung zur Zeitabhängigkeit
<i>Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell</i>	Verdampfung bzw. Sublimation	gering (Vernachlässigung Umgebungsbedingungen mit Ausnahme Wärmeübertragung)	Emissions-Massenstrom	prinzipielle Eignung bei Erweiterung zu zeitabhängigen Umgebungsbedingungen
<i>Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells CFAST (Zonenmodell)</i>	Stoffemission bei Brandereignis	Berücksichtigung brandspezifischer Parameter (Unterstellung Brandereignis)	keine (brandbedingte Massenanteile Rauchstrom)	keine Eignung, da Brandereignis unterstellt
<i>Emissionsmodelle des Brandschutzingenieurmodells FDS (Feldmodell)</i>	Verdampfung, Pyrolyse	Unterstellung Stoffzündung nach Emission	keine (brandbedingte Massenanteile nach Zündung)	keine Eignung, da Brandereignis unterstellt
	unmittelbare Vorgabe von Eingangsparametern: pauschale Annahme bzw. Abschätzung von Eingangsparametern der Ausbreitungsberechnung		erforderliche Eingangsgrößen Ausbreitungsberechnung	unmittelbare Verwendung, möglichst genaue Abschätzung erforderlich

Tabelle 4.1: Überblick zur Beurteilung von Emissionsmodellen

4.2 Modelle zur Stoffausbreitung

Modelle zur Stoffausbreitung dienen der rechnerischen Abbildung unterschiedlicher Stofftransportvorgänge, die zur ggf. zeitabhängigen Bildung ortsbezogener Stoffkonzentration in der Luft führen (vgl. [14, 15]). Die Bewertung von Tätigkeiten bzw. Arbeitsbedingungen beruht gemäß Kap. 2.1.4 auf diesen Luftkonzentrationen. Bei der Berechnung muss eine einzelfallbezogene Berücksichtigung der signifikanten Vorgänge, die ineinander übergehen oder sich überlagern können, über eine entsprechende Modellauswahl erfolgen.

Damit eine Zusammenführung von modellbezogenen Betrachtungen zur Stoffemission und -ausbreitung sowie der Bewertung der Arbeitssituation innerhalb eines rechnerischen Gesamtverfahrens erfolgen kann, müssen zwischen den einzelnen Betrachtungsschritten geeignete Ver-

knüpfungspunkte bestehen, die der Berücksichtigung von mit anderen Modellen ermittelten Zwischenergebnissen sowie der ggf. erforderlichen Rückkopplung dienen. Berechnungskonzepte zur Stoffausbreitung müssen somit einerseits die charakteristischen Parameter der jeweiligen Vorgänge, andererseits Ergebnisse vorgelagerter Emissions-Berechnungen erfassen und in die Konzentrationsberechnung überführen. Die Luftkonzentration stellt die Ergebnisgröße dar, die wiederum in den angeschlossenen Bewertungsschritt eingeht.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Stoffausbreitung wird durch die Raumgeometrie und allgemeine Rahmenbedingungen gebildet. Die tabellarischen Soll-Ist-Vergleiche von Eingangsgrößen der in [14, 15] beschriebenen Modelle mit den jeweiligen charakteristischen Parametern der Stofftransportvorgänge lassen diese äußeren Rahmenbedingungen jedoch zunächst unberücksichtigt, um zunächst ausschließlich die Umsetzung der physikalischen Grundlagen zu betrachten. Eine Einbindung und Diskussion der weiteren Bedingungen wird im Zuge der Konzeption des Gesamtverfahrens in Kap. 5 vorgenommen. In den folgenden Abschnitten wird jedoch bereits eine erste Abschätzung zur möglichen weiteren Beachtung im Rahmen eines rechnerischen Gesamtverfahrens des Arbeitsschutzes auf Grundlage der prinzipiellen Ansätze und vorhandenen Verknüpfungsmöglichkeiten dargelegt.

4.2.1 Diffusionsmodell

Sofern sich die Luft in Räumen weitgehend in Ruhe befindet und keine strömungsmechanischen Einflüsse wirken, tritt eine Stoffausbreitung aufgrund der temperaturabhängigen brown'schen Molekularbewegung durch Diffusion auf. Die Diffusion kann mittels des entsprechenden Modells für Gase bzw. für Stoffe mit gasähnlichem Verhalten und im Vergleich zur Umgebungsluft ähnlicher Dichte rechnerisch abgeschätzt werden, wobei die ggf. eintretende Beschleunigung des Vorgangs durch geringfügige Konvektion (turbulente Diffusion) Berücksichtigung findet [9, 14, 15].

Anhang B, Tab. B.7 zeigt die Gegenüberstellung der charakteristischen Parameter der Diffusion aus Anhang A, Tab. A.5 mit den Eingangsgrößen des Diffusionsmodells. Dabei wird insbesondere die Zusammenfassung verschiedener Parameter und Größen durch den stoffspezifischen Diffusionskoeffizienten untergliedert.

Das Diffusionsmodell, angelegt als Handrechenverfahren zur Ermittlung der konzentrationsabhängigen, diffusiven Stoffausbreitung in der Luft, berücksichtigt die entsprechenden charakteristischen Parameter in weiten Teilen. Dabei werden wesentliche Parameter im Rahmen der Abschätzung des Diffusionskoeffizienten in der Raumluft einbezogen, dessen Ermittlung sich situationsbedingt, z.B. vor dem Hintergrund des Auftretens minimaler konvektiver Strömungen, unterscheiden muss. Die tatsächliche Bestimmung dieser Eingangsgröße ist daher komplex, eine vereinfachte Ermittlung steht nicht unmittelbar zur Verfügung. Darüber hinaus finden weitere Parameter, welche auf die physikalische Impulshaltigkeit der Emission abzielen, keine Beachtung.

Durch die grundlegende Konzeption kann das Diffusionsmodell prinzipiell im Rahmen eines rechnerischen Gesamtverfahrens Berücksichtigung finden. Geeignete Verknüpfungspunkte bilden die Eingangsgröße des Emissions-Massenstroms und der Ergebniswert der abstandsbezogenen Stoffkonzentration in der Raumluft. Die umfangreichen Anwendungsgrenzen des Modells (u.a. Diffusion als alleiniger bzw. wesentlicher Stofftransportvorgang), die bei einer Verwendung überprüft und durch die jeweiligen Rahmenbedingungen eingehalten werden müssen, stehen jedoch der allgemeinen Einbindung entgegen. Desweiteren ist eine situationsbezogene Abschätzung des Diffusionskoeffizienten erforderlich. Durch diese Einschränkungen ist eine Verwendung nur in Einzelfällen möglich bzw. erforderlich, die eine allgemeine Berücksichtigung innerhalb eines Gesamtverfahrens als grundlegendes Ausbreitungsmodell nachrangig werden lässt. Das

Diffusionsmodell bildet daher lediglich eine situationsabhängige Ergänzung einer allgemeinen Systematik. Die Ausrichtung des Modells und seine Anwendungsbedingungen verhindern eine Einbindung als schwerpunktmäßiges Ausbreitungsmodell.

4.2.2 Zonenmodelle des Arbeitsschutzes

Zonenmodelle des Arbeitsschutzes ermöglichen die Berechnung der Ausbreitung eines emittierten Stoffes anhand von globalen Kontrollvolumen (bspw. gesamter Arbeitsraum). Dabei erfolgt keine detaillierte Auflösung einzelner Transportvorgänge, sondern vielmehr die generelle Einbindung der Stoffemission und der Luftströmungen zwischen den Kontrollvolumen durch die Verwendung von Quelltermen. Diese formulieren allgemeine Beziehungen des Massenaustauschs, ohne dabei orts- und vorgangsbezogene Untersuchungen durchzuführen [9, 14, 15].

Allgemein beschreiben Zonenmodelle (Luft-) Strömungen und die einhergehende Mitführung von Stoffen zwischen Kontrollvolumen. Weitergehende Ausbreitungsvorgänge sind durch pauschale Abschätzungen ohne Detailbetrachtungen subsummiert. In Anhang B, Tab. B.8 werden die in Anhang A, Tab. A.6 aufgeführten charakteristischen Parameter den Eingangsgrößen, die grundlegend allen Zonenmodellen trotz unterschiedlicher Anzahl an Kontrollvolumen gleich sind, gegenübergestellt. Weitere Ausbreitungsvorgänge, die in den Formulierungen ggf. über Zusatzbetrachtungen oder angepasste Abschätzungen untergeordnet Berücksichtigung finden, werden im Zuge des tabellarischen Vergleichs nicht dargestellt, da diese einzelfallbezogene Ergänzungen eines allgemeingültigen Ansatzes darstellen bzw. durch die globale Erfassung nicht spezifisch aufgelöst sind.

Es wird ersichtlich, dass Zonenmodelle des Arbeitsschutzes nicht auf die ortsbezogene Auflösung der Stoffausbreitung ausgelegt sind. Dementsprechend erfolgt keine weitreichende Berücksichtigung charakteristischer Parameter einzelner Ausbreitungsvorgänge. Vielmehr wird die Berechnung von Stoffkonzentrationen innerhalb der Luft über die pauschalisierte Abschätzung des Luft- bzw. Massenaustauschs samt mitgeführter Stoffkonzentrationen durchgeführt, die als Ergebniswerte zusammen mit dem Emissions-Massenstrom (als Eingangsgröße) geeignete Verknüpfungsmöglichkeiten zu anderen Betrachtungsschritten bilden. Eine detaillierte Betrachtung der eigentlichen Strömungsverhältnisse wird jedoch nicht aufgestellt, so dass ortsbezogene Betrachtungen nicht unmittelbar möglich sind.

Zonenmodelle des Arbeitsschutzes beruhen auf der Berechnung gemittelter, auf (teils große) Kontrollvolumen bezogener Stoffkonzentrationen. Verglichen mit dem physikalischen Stofftransport erfolgt einerseits keine detaillierte Auflösung von einzelnen Vorgängen bzw. von orts- und umgebungsabhängigen Änderungen der Strömungsbedingungen (z.B. infolge von Turbulenzen, Verhalten an Strömungshindernissen etc.). Andererseits besteht aufgrund der Mittelung keine Möglichkeit der ortsbezogenen Konzentrationsermittlung als Eingangswert in den Bewertungsschritt einer Tätigkeit; die Ergebnisse stellen globale Werte dar. Darüber hinaus sind die einzelnen Kontrollvolumen in ihrer Größe und Anordnung durch den Nutzer, z.B. anhand des Atembereichs der Beschäftigten, festzulegen, was eine unmittelbare und ggf. willkürliche Beeinflussung der Konzentrationsermittlung innerhalb der Modellrechnungen bedingt. Eine Systematik zur realitätsnahen Abbildung der Strömungs- und Konzentrationsbedingungen wird nicht erbracht. Trotz geeigneter Verknüpfungspunkte zu stoffspezifischen Emissions- und Bewertungsmodellen eignen sich Zonenmodelle des Arbeitsschutzes nicht zur weiteren Berücksichtigung bei der Ableitung eines rechnerischen Gesamtverfahrens, da keine Darstellung von Ausbreitungsvorgängen samt entsprechender Wiedergabe charakteristischer Parameter erfolgt. Der Einfluss umfassender Emissionsbedingungen (z.B. Geschwindigkeitseinfluss auf Strömungscharakteristiken) wird ebenso nicht berücksichtigt. Weiterhin darf bei den erzielten Ergebnissen nicht unmittelbar von

realitätsnahen Verhältnissen ausgegangen werden, da wesentliche Abhängigkeiten zu den verwendeten und vom Anwender beeinflussbaren Eingabegrößen (insbesondere Größe und Anordnung der Kontrollvolumen), die abgeschätzt und frei, ohne physikalischen Bezug festgelegt werden, bestehen. Die ermittelten Konzentrationen sind aufgrund der volumenbezogenen Mittelungen nicht zuverlässig dazu geeignet, ortsabhängige Betrachtungen zu begründen, da - z.T. erhebliche - Abweichungen von berechneten Mittelwerten konzeptionell nicht ausgeschlossen sind.

4.2.3 Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)

Die Strahlgesetze ermitteln die Verhältnisse innerhalb eines Freistrahls, der sich aufgrund von impulsbehafteten Emissionen ausbildet. Diese wurden für unterschiedliche Emissionsgeometrien aus theoretischen Betrachtungen abgeleitet und nachgewiesen [14, 15, 78].

In Anhang B, Tab. B.9 werden die charakteristischen Parameter eines Freistrahls (vgl. Anhang A, Tab. A.7) den in den Strahlgesetzen tatsächlich berücksichtigten Eingangsgrößen gegenüber gestellt. Dabei ist einerseits zu beachten, dass eine Bestimmung ortsbezogener Konzentrationen in den Formulierungen nicht vorgesehen ist und nur über Nebenbetrachtungen zum Emissions-Massenstrom eines Stoffes und innerhalb des Volumenstroms erzielt werden kann. Andererseits finden Strömungsparameter der Umgebung, die bspw. zu einer Auflösung der Strahlgeometrie führen, keine Beachtung. Innerhalb des Modells bestehen Fallunterscheidungen hinsichtlich der Berücksichtigung temperaturbezogener Effekte sowie der Ausrichtung der Strömungsöffnung, die an dieser Stelle nicht näher differenziert werden.

Die mathematischen Korrelationen, die auf theoretischen Ableitungen und Fallunterscheidungen unter semi-empirischer Anpassung auf verschiedene Öffnungsgeometrien und -ausrichtungen beruhen, beziehen eine Vielzahl charakteristischer Parameter der Ausbreitung als impulsbedingte Eigenströmung ein. Dabei werden jedoch im Wesentlichen Parameter außen vor gelassen, die eine Beeinflussung des Strömungsverlaufs infolge der Eigenschaften der Umgebungsatmosphäre - mit Ausnahme der Einbeziehung der Wirkung und Veränderungen unterschiedlicher Temperaturen - charakterisieren. Die ergänzende Einbeziehung der Archimedeszahl als dimensionslose Kennzahl berücksichtigt jedoch entsprechende Parameter. Über die Berücksichtigung von Emissions-Massenstrom und -Geschwindigkeit erfolgt die Verknüpfung zur Stofffreisetzung. Der Ansatz sieht keine Ermittlung ortsbezogener Stoffkonzentrationen vor, sodass zunächst keine Anbindung an die erforderliche Bewertung der Arbeitssituation besteht.

Um Strahlgesetze geeignet in ein Gesamtverfahren zur Ermittlung und Bewertung ortsbezogener Stoffkonzentrationen in der Luft am Arbeitsplatz einzubinden, ist eine Ergänzung des bestehenden Formelwerks zur Bestimmung von Konzentrationsverläufen in der Strahl-Mittelachse erforderlich: Im herkömmlichen Sinn bestimmen Strahlgesetze lediglich den Gesamt-Volumenstrom in Abhängigkeit zur Entfernung zur Emissionsöffnung. Werden diese Betrachtungen durch Relation auf einen emittierten Massenstrom ergänzt, der im Rahmen des Strömungsverlaufs mitgeführt wird, resultiert die Abschätzung ortsbezogener Konzentrationen. Dieser stark vereinfachte Ansatz beruht allerdings auf der Annahme, dass der emittierte Stoff vollständig im Strahlbereich verbleibt und keine Entmischung in die Umgebung (z.B. durch überlagernde Effekte) auftritt.

Grundlage der Strahlgesetze bilden theoretisch begründbare Ableitungen unter Berücksichtigung der zentralen Erhaltungsgleichungen des Stofftransports, so dass die Einführung der Nebenbetrachtungen prinzipiell eine Einbindung in ein rechnerisches Gesamtverfahren ermöglicht. Dabei sind Verknüpfungspunkte durch die emittierten Massen- und Gesamt-Volumenströme sowie zu ermittelnde Konzentrationen in der Strahl-Mittelachse gegeben. Demgegenüber besteht die Einschränkung, dass die abgeleiteten Verhältnisse lediglich Punkte innerhalb der Strahl-Mittelachse betrachten. Darüber hinaus können Berechnungen lediglich unter stationären Be-

dingungen ohne Zeitabhängigkeiten erfolgen. Weiterhin bleiben die Strömungsbedingungen der Umgebungsatmosphäre und ein möglicher Massentransport aus dem Freistrahls heraus unberücksichtigt, so dass die singulären Betrachtungen nur eingeschränkt zur Anwendung kommen können. Die tatsächliche Einbindung in ein Gesamtverfahren bleibt daher davon abhängig, ob die Ausbildung eines Freistrahls ggf. auch mit einem anderen Modell abgebildet wird.

4.2.4 Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs

Ein vertikaler Stofftransport kann neben externen Einflüssen ebenfalls durch Dichteunterschiede zwischen Stoff und der Umgebungsatmosphäre bzw. -luft bedingt sein. Für beide Stoffe bzw. Komponenten hängt die lokale Dichte von den inhärenten Stoffeigenschaften in Verbindung mit der vorherrschenden Temperatur ab. Es tritt eine auf- oder abwärts gerichtete Stoffausbreitung in Raumbereiche ein, in denen eine gleiche Dichte vorherrscht, wo sich ggf. durch weitere Vorgänge eine horizontale Verbreitung anschließt. Möglicherweise überlagern anderweitige Strömungen (z.B. infolge der Raumlüftung) den dichtebedingten Stofftransport.

Die einfache Gegenüberstellung der Stoffeigenschaften unter Einfluss der aktuellen Temperatur mit den entsprechenden Parametern der Umgebungsluft ermöglicht die Analyse des vertikalen Ausbreitungspotentials. Hierdurch findet jedoch lediglich eine Abschätzung kritischer (vertikaler) Bereiche statt, die ggf. weiterer detaillierter Untersuchungen der eintretenden Verhältnisse bedürfen. Eine Ermittlung ortsabhängiger Stoffkonzentrationen erfolgt nicht [14, 15, 79].

Tab. B.10 des Anhangs B vergleicht die charakteristischen Parameter des dichtebedingten Stofftransports (vgl. Anhang A, Tab. A.8) mit den Möglichkeiten zur Abschätzung des generellen vertikalen Ausbreitungspotentials. Andere Ausbreitungsvorgänge, die einen Stofftransport überlagern bzw. dessen Richtung und Ausprägung ggf. verändern, bleiben unberücksichtigt.

Die Abschätzung des dichtebedingten Auf- oder Abtriebs eines Stoffes nach dessen Emission beinhaltet die wesentlichen charakteristischen Parameter des Stofftransportvorgangs. Es erfolgt jedoch lediglich eine überschlägige Beurteilung, inwiefern die prinzipielle Stoffausbreitung ohne Berücksichtigung weiterer Strömungsvorgänge eintritt. Daraus ergibt sich ausschließlich eine Identifizierung bzw. Eingrenzung ggf. kritischer Bereiche durch eine vertikale Stoffschichtung in der Umgebungsatmosphäre. Entgegen anderen Ausbreitungsmodellen dient die Abschätzung des dichtebedingten vertikalen Stofftransports nicht der Ermittlung von Massenströmen der Stoffausbreitung. Es erfolgt keine Berücksichtigung der Strömungslage innerhalb des Raumes.

Eine Einbindung in ein rechnerisches Gesamtverfahren als eigenständiges Ausbreitungsmodell ist nicht möglich, da keine Abschätzung von Stoffkonzentrationen zur Verfügung steht. Ebenso werden strömungsmechanische Emissionsbedingungen - z.B. des Massenstroms oder der Geschwindigkeit - nicht betrachtet. Eine informelle Verwendung innerhalb des Gesamtverfahrens als ergänzende, überschlägige Betrachtung kann jedoch trotzdem sinnvoll sein: Dabei steht nicht die eigentliche Konzentrationsermittlung im Fokus, vielmehr besteht die Möglichkeit zur qualitativen Ermittlung möglicherweise kritischer Bereiche bzw. der bevorzugten Ausbreitungsrichtung bereits im Vorfeld detaillierter und ggf. aufwändiger Berechnungen, die einer genaueren Analyse bedürfen. Die Verknüpfung erfordert einen Bezug zu den relevanten Stoffeigenschaften, die im Zuge der Emissionsbetrachtung festzustellen sind. In diesem Rahmen ist gleichermaßen die Feststellung von Strömungsverhältnissen des Raumes, die eine vertikale Stoffausbreitung beeinflussen oder überlagern können, notwendig.

4.2.5 Handrechenmodelle zur Beurteilung der Rauchausbreitung

Aus dem Brandschutzingenieurwesen stehen unterschiedliche Handrechenmodelle verschiedener Ausrichtung zur Verfügung. Diese betrachten u.a.

- die Erfassung der Verhältnisse des vertikalen Rauchaufstiegs oberhalb der Brandfläche (Plume-Modelle),
- die Beschreibung der horizontalen Rauchausbreitung unterhalb von Raumdecken (Ceiling-Jet-Modelle) und
- die Abschätzung der Durchströmung und des Massentransports durch Raumöffnungen in benachbarte Räume bzw. ins Freie [14, 15, 80–82].

Die verschiedenen Konzepte, in denen unterschiedliche Formulierungen (bspw. infolge von Anpassungen an empirisch ermittelte Versuchsdaten) vorliegen, stellen singuläre Betrachtungen in Abhängigkeit zur Brandfläche und zu den Umgebungsbedingungen an. Die Beschreibung unterschiedlicher Ausbreitungsvorgänge erfolgt brandspezifisch, z.B. als thermisch- bzw. dichtebedingter Rauchaufstieg oder horizontale Rauchausbreitung und Öffnungsdurchströmung infolge eines erhöhten strömungsmechanischen Drucks. Grundlage der Beurteilung bilden dennoch die jeweiligen charakteristischen Parameter der Stofftransportvorgänge.

Die Modellkonzepte zielen auf die Bestimmung der brandspezifischen Rauchausbreitung als Strömungsbild ab. Dabei werden insbesondere eintretende Massenströme, Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Temperaturen ermittelt. Weiterhin sehen die Ansätze infolge der Unterstellung eines Brandereignisses eine vordefinierte Rauchenstehung, die Einmischung von Umgebungsluft in den Plume sowie eine Vorzugsrichtung der Ausbreitung über die Raumhöhe sowie im weiteren Verlauf horizontal vom Brandherd weg modellspezifisch vor.

Plume-Modelle zielen auf die Ermittlung des entstehenden Rauchgas-Massenstroms oberhalb des Brandherdes über die Höhe hinweg und die abstandsabhängige Entwicklung von Strömungsgeschwindigkeit und Gastemperatur ab. Dabei finden weder die Strömungsbedingungen des Raumes, die den vorausgesetzten Rauchaufstieg ggf. überlagern bzw. verändern, noch Ermittlungen zur Konzentrationsberechnung innerhalb des Rauches Berücksichtigung. Die detaillierte, höhenbezogene Konzentrationsuntersuchung erfordert daher Randbetrachtungen über Vorgaben der stofflichen Zusammensetzung der Verbrennungsprodukte.

Ceiling-Jet-Modelle sind auf die rechnerische Ermittlung der horizontalen Rauchausbreitung unterhalb von Decken ausgerichtet, die sich temperatur- bzw. dichtebedingt in Abhängigkeit vom Abstand zum Brandherd ergeben. Der Stofftransport beruht auf dem erhöhten strömungsmechanischen Druck des Rauchs. Die Modelle ermöglichen eine Berechnung von Strömungsgeschwindigkeit und Gastemperatur. Die Ermittlung auftretender Massenströme, die sich infolge von Verwirbelungen zwischen Rauchsicht und der darunter liegenden raucharmen Schicht ergeben können, ist nicht vorgesehen. Dementsprechend kann keine Konzentrationsberechnung - auch nicht über ergänzende Betrachtungen - durchgeführt werden.

Modelle zur Betrachtung der Durchströmung von Raumöffnungen beruhen auf grundlegenden Ableitungen strömungsmechanischer Bedingungen, u.a. aus der sog. Bernoulli-Gleichung [73]. Dabei erfolgt eine Berechnung der in den Raum ein- und aus dem Raum austretenden Massenströme sowie der Strömungsgeschwindigkeiten. Grundlage bilden die Annahmen einer Rauchsicht innerhalb des Raumes sowie eines Rauchgas-Massenstroms des Plumes als Eingangswert. Die unterstellten Strömungsverhältnisse beruhen ebenfalls auf dem temperatur- bzw. dichtebedingten erhöhten strömungsmechanischen Druck des Rauchs bei Erreichen der Raumöffnung. Dementsprechend erfolgt unmittelbar in den Öffnungen eine singuläre Betrachtung der Strömungsverhältnisse, die eine Bestimmung von ortsbezogenen Konzentrationen sowie der Vermischung infolge gegensätzlicher Gas- bzw. Luftströmungen nicht vorsieht bzw. auch über Nebenbetrachtungen innerhalb der Öffnungsfläche nicht gestattet.

Zusammengefasst verzichten brandschutzspezifische Handrechenmodelle auf die Erfassung ortsbezogener Konzentrationen von emittierten Verbrennungsprodukten innerhalb des Betrachtungs-

raumes und berücksichtigen diese lediglich zum Teil über Randbetrachtungen. Weiterhin sind die verschiedenen Korrelationen an die besonderen Verhältnisse eines Brandereignisses - hier insbesondere unter Bezug auf eine Wärmefreisetzung sowie die entstehende Temperaturerhöhung innerhalb der Strömungen - angepasst, welche diese Größen als Grundlage einbeziehen. Darüber hinaus findet keine Beachtung der Strömungsbedingungen der Umgebungsatmosphäre statt, die die Verhältnisse beeinflussen.

Aufgrund der auf Brände eingeschränkten Anwendungsbedingungen, der spezifischen Anpassungen, der Berücksichtigung brandspezifischer Eingangsgrößen und der nicht vorgesehenen Ermittlung ortsbezogener Konzentrationsverhältnisse sind die verschiedenen Handrechenmodelle des Brandschutzingenieurwesens zur Beurteilung der Rauchausbreitung nicht geeignet, Verwendung in einem allgemeinen rechnerischen Gesamtverfahren des Arbeitsschutzes zu finden. Der Berücksichtigung der Korrelationen für Einzelfälle, in denen Emissionen mit erhöhten Temperaturen auftreten bzw. Wärmequellen innerhalb der Räume die Stoffausbreitung verantworten, stehen die Verwendung von i.A. brandspezifischen Eingangsgrößen sowie die singulären Betrachtungsansätze einzelner Phasen der Stoffausbreitung entgegen. Weiterhin verwenden die Modelle Korrelationsfaktoren, die sich auf empirische Untersuchungen von Brandereignissen stützen, so dass dieser eindeutig definierte Anwendungsbereich ebenso der allgemeinen Verwendung widerspricht⁷⁴.

4.2.6 Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell CFAST (Zonenmodell)

Zonenmodelle des Brandschutzes beruhen auf der Berechnung gemittelter Größen für übereinanderliegende Kontrollvolumen in Betrachtungsräumen, die über Quellterme miteinander verknüpft sind. Die voneinander abhängige Berechnung der Verhältnisse in diesen Kontrollvolumen unter Berücksichtigung brandspezifischer Bedingungen vollzieht die Rauchausbreitung - ggf. über mehrere Räume hinweg - nach. Die Rauchausbreitung wird durch den Aufstieg oberhalb der Brandfläche, die horizontale Strömung unterhalb von Decken bzw. Strömungshindernissen von der Brandfläche weg sowie die Durchströmung von Raumöffnungen ausgebildet. Konzeptionell unterstellen Zonenmodelle eine Vorzugsrichtung der Ausbreitung sowie eine daran orientierte Anordnung der Kontrollvolumen, die sich in thermisch bedingten Dichteunterschieden zwischen Rauch und Umgebungsluft begründet [14, 15, 63, 80–82].

Bei der rechnerischen Ermittlung der Rauchausbreitung mit computerbasierten Zonenmodellen (bspw. durch das hier angeführte Modell CFAST [64, 65]) ist eine Konzentrationsberechnung der enthaltenen Rauchkomponenten prinzipiell möglich. Es werden unterschiedliche physikalische Ausbreitungsvorgänge betrachtet, deren Ausbildung aus den besonderen Bedingungen des zugrundeliegenden Brandereignisses (insbesondere erhöhte Temperaturen infolge der Wärmefreisetzung des Brandes sowie der Einmischung von Umgebungsluft in den Plume) entsteht. Dabei müssen insbesondere die Ausbreitungsvorgänge des dichtebedingten Auftriebs, der Eigenströmung infolge impulsbehafteter Emissionsvorgänge sowie der Mitführung innerhalb von Luftströmungen samt der jeweiligen charakteristischen Parameter (vgl. Anhang A, Tab. A.8, Tab. A.7 und Tab. A.6) geeignet abgebildet werden.

Grundlegende Bestandteile brandschutztechnischer Zonenmodelle sind die jeweiligen Quellterme zur Beschreibung der Interaktion der Kontrollvolumen untereinander, die auf die spezifischen Vorgänge eines Brandes angepasst sind und auf der Grundlage der Handrechenverfahren beruhen (siehe Kap. 4.2.5). Die geschlossene Betrachtung der Verhältnisse entsteht aus der zeitabhängigen Verknüpfung der Ansätze [64, 65].

⁷⁴ Aufgrund des generellen und vorweg absehbaren Ausschlusses einer weiteren Verwendung für Arbeitsschutz-Betrachtungen wird auf die tabellarische Gegenüberstellung mit charakteristischen Parametern verzichtet.

Die im Rahmen des Zonenmodells CFAST angewandten Korrelationen zur Beschreibung der Rauchausbreitung beruhen auf empirischen Ableitungen, die sich ausschließlich auf die Beschreibung von Brandereignissen beziehen. Daraus folgt die Begrenzung des Anwendungsbereichs brandschutztechnischer Zonenmodelle auf Raumbrände. Eine allgemeine Nutzung, z.B. im Rahmen eines rechnerischen Gesamtverfahrens zur Gefahrstoffausbreitung, ist aufgrund der Anwendungs- bzw. erfassten Randbedingungen, die in die Formulierungen unmittelbar eingehen, nicht gegeben. Dabei steht die vorgegebene Ausbreitungsrichtung ggf. ebenso dem Stoffverhalten in Arbeitssituationen entgegen wie die Annahme eines sich erheblich vergrößernden (Rauch-) Massenstroms, der aus der Einmischung von Umgebungsluft resultiert. Weiterhin erfolgt die Berechnung der Konzentrationen von im Brandrauch enthaltenen Komponenten auf Grundlage von durch den Nutzer vorzugebenden Massenanteilen der freigesetzten Verbrennungsprodukte in Relation zur eingemischten Umgebungsluft. Dabei wird ebenfalls eine volumenbezogene Mittelung für die verschiedenen Zonen durchgeführt, eine orts- und vorgangsbezogene Ausbreitungsbetrachtung erfolgt dementsprechend nicht. Darüber hinaus bilden brandspezifische Parameter (z.B. Wärmefreisetzungsrates des Brandes) die Eingangsgrößen der Zonenmodelle, die in die Quellterme einfließen. Die Ausgabewerte brandbedingter Größen - z.B. Temperaturen, Massenströme oder Schichthöhen - haben für Bewertungen des Arbeitsschutzes untergeordnete bzw. keine Relevanz. Eine Einbindung des Zonenmodells CFAST kann weiterhin durch die fehlende Möglichkeit der Darstellung stofflicher Emissionen nicht erfolgen (siehe Kap. 4.1.8). Abschließend bestehen die in Kap. 4.2.5 genannten Einschränkungen aufgrund der unmittelbaren Nutzung der Korrelationen gleichermaßen. Dementsprechend ist die Möglichkeit zur Einbindung brandschutztechnischer Zonenmodelle in ein rechnerisches Gesamtverfahren zur Beurteilung von Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen aufgrund der allgemeinen Modellkonzeption und -ausrichtung sowie der unbegriffenen Randbedingungen nicht gegeben⁷⁵.

4.2.7 Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell FDS (Feldmodell)

Brandschutztechnische Feldmodelle beruhen auf dem Konzept von CFD-Ansätzen, die eine dreidimensionale Berechnung der Stoffausbreitung sowie der sich ergebenden ortsbezogenen Konzentrationen über eine Vielzahl interagierender Kontrollvolumen ermöglichen. Dabei erfolgt einerseits die allgemeine rechnerische Abbildung unterschiedlicher Ausbreitungsvorgänge, die eine räumliche Verteilung von Brandrauch mitsamt enthaltener Komponenten sowie ggf. zusätzlich freigesetzter Stoffe darstellt. Andererseits sind weitere Untermodelle implementiert, die unterschiedliche brandspezifische Vorgänge (bspw. Wärmetransport infolge von Strahlung, Möglichkeit zur Berechnung der Brandausbreitung etc.) berücksichtigen [11, 12, 14, 15, 63, 80–82].

Da Feldmodelle auf allgemeinen strömungsmechanischen Formulierungen beruhen, sind die Quellterme nicht empirisch ermittelt, sondern aus theoretischen Überlegungen der Strömungsmechanik abgeleitet. Eine Anpassung auf brandspezifische Vorgänge ist ggf. nur durch verwendete Annahmen gegeben, die jedoch nicht ausschließlich für Brandereignisse gelten (z.B. Annahme "geringer" Strömungsgeschwindigkeiten deutlich unterhalb lokaler Schallgeschwindigkeiten). Dementsprechend erfolgt generell eine "freie" Ausbreitungsberechnung. Dabei müssen grundsätzlich die allgemeinen strömungsmechanischen, charakteristischen Parameter der verschiedenen Ausbreitungsvorgänge, die zu einem Massentransport führen und im Brandfall, aber auch in von Brandereignissen unabhängigen Betrachtungen, auftreten, innerhalb der verwendeten Algorithmen (Umsetzung der numerischen Strömungsmechanik) Berücksichtigung finden

⁷⁵ Aufgrund des konzeptionell bedingten Ausschlusses der Verwendung brandschutztechnischer Zonenmodelle für ein Gesamtverfahren im Arbeitsschutz wird an dieser Stelle auf die tabellarische Gegenüberstellung der Modellgrößen zu charakteristischen Parametern verzichtet.

(vgl. Anhang A, Tab. A.5 bis Tab. A.8). Weiterhin müssen die in [14, 15] angeführten allgemeinen Erhaltungssätze der Strömungsmechanik einbezogen werden. Die weitergehenden - ggf. brandbezogenen - Untermodelle (z.B. Ermittlung von Bauteilerwärmungen) verfügen gleichermaßen über unterschiedliche charakteristische Parameter, die an dieser Stelle nicht betrachtet werden.

Das Feldmodell FDS stellt eine Möglichkeit zur rechnerischen Gesamtbetrachtung einer Brand- und Rauchausbreitung sowie einhergehender brandbedingter Vorgänge dar. Es weist aufgrund der Berücksichtigung der Navier-Stokes-Gleichungen (vgl. [73]) und verschiedener Untermodelle eine Vielzahl von Eingangsgrößen auf. Daher sind Eingangswerte, die zur Berechnung der zentralen Ausbreitungsvorgänge erforderlich werden, von Größen untergeordneter Modelle sowie von allgemeinen Steuergrößen⁷⁶ zu unterscheiden. Eine eindeutige Trennung der verschiedenen Untermodelle kann jedoch nicht erfolgen, da sich diese oftmals ebenso auf die Ausbreitungsrechnungen auswirken bzw. der Einbeziehung verschiedener physikalischer Effekte, die nicht nur in Brandfällen auftreten können (z.B. durch heiße Oberflächen emittierte Wärmestrahlung), dienen. Gleichermäßen nutzen die implementierten Ansätze verschiedene Eingangsgrößen ggf. gemeinsam [11, 12, 14, 15].

Tab. B.11 in Anhang B stellt den charakteristischen Parametern der Ausbreitungsvorgänge für Gase die spezifischen Eingangsgrößen des Modells FDS, die der Charakterisierung der Bedingungen zur Anwendung der Navier-Stokes-Gleichungen dienen, gegenüber. Die Aufstellung führt die in [11, 12, 66, 67] erörterten Eingangsgrößen explizit in die Ausführungen ein, wobei gegenseitige Beeinflussungen an dieser Stelle nicht erläutert werden. Die unterschiedlichen Größen liegen innerhalb der Modellkonzeption entweder als unmittelbare Eingabewerte⁷⁷ oder aber aus modellinternen Nebenbetrachtungen vor, so dass die Algorithmen verschiedene weitergehende, konzeptionelle Rahmenbedingungen erfassen. Weitere Eingangswerte, die für ergänzende Teilmodelle bzw. die allgemeine Steuerung erforderlich sein können, führt die Aufstellung dagegen nicht auf, da lediglich die Faktoren und die Modellkonzeption zur Beschreibung der Ausbreitungsvorgänge dargestellt werden sollen⁷⁸.

Das Brandschutzingenieurmodell bezieht die verschiedenen charakteristischen Parameter unterschiedlicher Ausbreitungsvorgänge umfassend ein. Die Grundlagen dazu bilden die Anwendung der Herleitungen und Formulierungen der numerischen Strömungsmechanik (hier: Navier-Stokes-Gleichungen zur Massen-, Impuls- und Energierhaltung [11, 12, 73]) sowie die Einbeziehung weitreichender Untermodelle zur Beschreibung physikalischer Effekte. Die verschiedenen Größen sind entweder unmittelbare Eingabewerte für die implementierten Algorithmen oder werden modellintern aus den Rahmenbedingungen abgeleitet bzw. ortsabhängig berechnet. Das Modell erfasst dabei insbesondere die gegenseitige Beeinflussung unterschiedlicher Vorgänge aufeinander und die damit verbundenen, ortsbezogenen Reaktionen und Veränderungen der Parameter. Mit Ausnahme von Emissions- und Belüftungsparametern sind die verwendeten thermodynamischen und strömungsmechanischen Größen daher Anfangsbedingungen.

⁷⁶ Eingangswerte, die nicht der unmittelbaren Erfassung von Strömungen sowie weiterer physikalischer Vorgänge dienen, sondern die Funktionsweise und Beachtung verschiedener Algorithmen beeinflussen (z.B. Vorgabe der Zeitschrittweite der Berechnungsschritte, Abstände von Zwischenspeicherungen, Beachtung des Untermodells zur Wärmestrahlung etc.).

⁷⁷ Die Befehlsstruktur des Modells FDS sieht eine Eingabe der verschiedenen Größen unter Verwendung von Eingabezeilen, die über Kurzformen als Arten gekennzeichnet werden, sowie eines innerhalb dieser Zeilenart zulässigen Befehls vor. Ein Befehl kann daher mit unterschiedlichen Auswirkungen in verschiedenen Zeilenarten anzutreffen sein [12]. Die Eindeutigkeit der Eingabegröße entsteht erst aus der Kombination der Zeilenart sowie des Befehls. Anhang B, Tab. B.11 führt die modellspezifischen Eingangsgrößen daher in der Form `ART BEFEHLSZEILE:BEFEHL` auf, um die unterschiedlichen Größen eindeutig darzustellen.

⁷⁸ Im Hinblick auf ein rechnerisches Gesamtverfahren kann eine Berücksichtigung weiterer Eingangsgrößen erforderlich werden. Diese sind im Rahmen der Ableitung des Gesamtkonzepts weiter erläutert und in die Betrachtungen einbezogen (vgl. Kap. 5).

Die Möglichkeit zur Berechnung der Stoffausbreitung mit brandschutztechnischen Feldmodellen - konkret am Beispiel des Modells FDS - ist ohne Bezug auf empirisch abgeleitete Quellterme oder eine Vorzugsrichtung gegeben. Aufgrund dessen besteht das Potential, auch in anderen Anwendungsgebieten mit Fokus auf die Ermittlung von stoffbezogenen Ausbreitungen in der Luft Verwendung zu finden. Die Algorithmen bzw. die Berechnungssystematik machen die Definition eines Brandereignisses nicht zwingend erforderlich [12]. Die Möglichkeit zur Einbindung externer Emissionsmodelle, die über die Parameter zur Vorgabe einer unmittelbaren Stofffreisetzung gegeben ist, sowie die Ergebnisgröße der ortsbezogenen Stoffkonzentrationen innerhalb der Luft bilden die erforderlichen Verknüpfungspunkte zur methodischen Ergänzung des Modells (vgl. Kap. 4.1.9). Dementsprechend ist eine Verwendung im Rahmen eines rechnerischen Gesamtverfahrens des Arbeitsschutzes zur stoffspezifischen Beurteilung von Arbeitsbedingungen möglich. Aufgrund der implementierten Untermodelle sowie der Vielzahl möglicher Eingabegrößen resultiert eine hohe Flexibilität des Berechnungsmodells. Aus dieser Flexibilität der Parametrisierung folgt jedoch gleichermaßen der Nachteil, dass eine unmittelbare Anwendung, ohne weitere Einarbeitung und genaue Kenntnis des Modells durch den Nutzer, nicht erfolgen kann. Ebenso stellt ein umfangreicher (erforderlicher) Datensatz zwar eine genaue Abbildung der Arbeitssituation dar, dazu ist jedoch eine präzise Erfassung bzw. Abschätzung dieser Rahmenbedingungen zwingend erforderlich. Die Annahme von Eingangsgrößen beeinflusst die Ergebnisse und kann aufgrund der Komplexität der Ansätze weitreichende Folgen haben, die ggf. nicht unmittelbar ersichtlich sind [11, 66]. Dabei muss eine entsprechend strukturierte und vollständige Erfassung der Größen gewährleistet sein, die über eine Systematik standardisiert werden sollte.

Die Konzeption der Feldmodelle ist - trotz der allgemeinen Beachtung der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen und Berechnung einer "freien" Rauch- bzw. Stoffausbreitung - auf die Abbildung von Verhältnissen im Brandfall ausgelegt. Das Modell FDS umfasst im Besonderen die Vorgänge im Bereich niedriger Mach-Zahlen mit entsprechender Validierung [11, 12, 66, 67]. Die allgemeine Verwendbarkeit des Modells auch auf arbeitsschutztypische Fragestellungen, also Stoffausbreitungen ohne Brandereignis, muss für den praktischen Einsatz durch Validierungsuntersuchungen nachgewiesen werden. Die Erweiterung des Anwendungsbereichs bildet die Grundlage für Übertragung und Einsatz in einem Gesamtverfahren des Arbeitsschutzes. Die Validierungen müssen weiterhin feststellen, ob die Verknüpfung zu anderen Modellen ausreichend gegeben oder ggf. konzeptionell zu ergänzen ist.

4.2.8 Zusammenfassender Überblick

Die Kap. 4.2.1 bis Kap. 4.2.7 erörtern die Verwendungs- bzw. Übertragungsmöglichkeiten von Modellen zur Stoffausbreitung im Zuge eines Gesamtverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung. Tab. 4.2 gibt einen Überblick über die Beurteilungsergebnisse, aus dem auch vorhandene Schnittstellen zur Ermittlung der Stoffemission ("Eingang") sowie zur Bewertung der Arbeitsbedingungen ("Ergebnis") hervorgehen.

Modell	Vorgang transport	Stoff-	Wiedergabe cha- rakteristischer Parameter	Schnittstellen	Eignung für Ge- samtverfahren
<i>Diffusionsmodell</i>	Ausbreitung durch Diffusion	durch	in weiten Teilen	Eingang: Emissions- Massenstrom, Ergebnis: abstands- und zeit- abhängige Stoffkon- zentration	prinzipielle Eignung, wenn Diffusion als einziger Ausbreitungsvorgang nachgewiesen

Modell	Vorgang Stofftransport	Wiedergabe charakteristischer Parameter	Schnittstellen	Eignung für Gesamtverfahren
Zonenmodelle des Arbeitsschutzes	pauschale Ausbreitung	keine	Eingang: Emissions-Massenstrom Ergebnis: zeitabhängige, volumengemittelte Stoffkonzentration	keine Eignung aufgrund volumenbezogener Mittelwerte
Modell des Freistrahls (Strahlgesetz)	Ausbreitung durch impulsbehaftete Emission	in weiten Teilen (Vernachlässigung Strömungsbedingungen der Umgebung)	Eingang: Emissions-Massenstrom Ergebnis: Stoffkonzentration (Berücksichtigung von Massenanteilen)	prinzipielle Eignung bei Ergänzung von Massenanteilen (Beschränkung auf Strahlbereich)
Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs	dichtebedingte Ausbreitung	in weiten Teilen (Vernachlässigung Strömungsbedingungen der Umgebung)	keine	Eignung zur Identifizierung ggf. kritischer Bereiche, keine eigenständige Ausbreitungsbe-rechnung
Handrechenmodelle zur Beurteilung der Rauchausbreitung	brandbedingte Rauchausbreitung	Berücksichtigung brandspezifischer Parameter (Unterstellung Brandereignis)	keine	keine Eignung, da Brandereignis unterstellt
Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell CFAST (Zonenmodell)	brandbedingte Rauchausbreitung	Berücksichtigung brandspezifischer Parameter (Unterstellung Brandereignis)	Ergebnis: volumengemittelte Stoffkonzentration aus Massenanteilen der Rauchkomponenten	keine Eignung, da Brandereignis unterstellt
Stoffbezogene Ausbreitungsberechnung im Brandschutzingenieurmodell FDS (Feldmodell)	„freie“ Ausbreitung durch div. Transportvorgänge	umfassend für div. Ausbreitungsvorgänge	Eingang: flächenbezogener Emissions-Massenstrom Ergebnis: ortsbezogene, zeitabhängige Stoffkonzentration	prinzipielle Eignung (ggf. auch für Vor-betrachtungen zu Umgebungsbedingungen)

Tabelle 4.2: Überblick zur Beurteilung von Ausbreitungsmodellen

4.3 Konzepte zur Bewertung der Stoffkonzentration am Arbeitsplatz

Die Bewertung von Tätigkeiten im Umgang mit Gefahrstoffen erfolgt durch den Vergleich von ortsbezogenen, im Arbeitsraum vorliegenden Konzentrationen mit Grenzwerten. Diese liegen entweder als zeitbezogene Mittelwerte oder als Maximalwerte vor. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Konzentrationen innerhalb der Luft am Arbeitsplatz der Beschäftigten oftmals nicht konstant über die gesamte Aufenthaltsdauer hinweg verhalten. Daher ist eine mathematische Vereinheitlichung und Korrelation verschiedener Expositionswerte, denen Beschäftigte ausgesetzt sind, erforderlich, deren Aufbau bspw. [15] erläutert. Weiterhin sind aufgrund der Arbeitsorganisation (z.B. durch wechselnde Tätigkeiten) nicht über eine gesamte Schicht verlaufende oder verschieden lange Expositionsdauern möglich.

Bei den mathematischen Ansätzen, die für einen Grenzwertvergleich zur Verfügung stehen, handelt es sich im eigentlichen Sinne um kein Berechnungsmodell zur möglichst realitätsnahen Wiedergabe der eintretenden Verhältnisse. Vielmehr dienen die Ansätze der Zusammenführung gewonnener Erkenntnisse von Tätigkeiten, die sich einerseits über die stofflichen Bedingungen (insbesondere zeit- und ortsabhängige Konzentrationen), andererseits über die räumlich-zeitliche Koinzidenz mit anwesenden Beschäftigten erstrecken. Dementsprechend existieren keine charakteristischen Parameter, die Bewertung benötigt jedoch folgende Eingangsgrößen [15, 45]:

- stoffspezifischer Grenzwert (sofern vorhanden: AGW) samt Angabe des zeitlichen Bezugs,
- ortsbezogene, zeitabhängige Stoffkonzentrationen in der Arbeitsplatzluft,
- Aufenthalts- bzw. Expositionsdauer der Beschäftigten sowie
- Zuordnung des zeitlich-örtlichen Zusammentreffens der Stoffkonzentrationen und des Aufenthalts der Beschäftigten.

Ein rechnerisches Gesamtverfahren erfordert zwingend die Einbindung der unterschiedlichen Ansätze zur mathematischen Bewertung von Tätigkeiten, um eine Aussage zur formalen Zulässigkeit bzw. Gefährdung von Beschäftigten zu erhalten. Dieser liegen die vorgenannten Hazard- und Expositions-Parameter (siehe Abb. 1.1) als Eingangswerte zugrunde, die aus den vorangegangenen rechnerischen Betrachtungen zur stofflichen Emission und Ausbreitung ermittelt bzw. anhand der Analyse der Arbeitssituation eruiert werden müssen. Beim Einsatz von Berechnungsmodellen bilden somit die zeitabhängigen, stoffbezogenen Luftkonzentrationen die entsprechende Schnittstelle in Form von Berechnungsergebnissen. Ebenfalls benötigte Grenzwerte und Aufenthaltsdauern der Beschäftigten leiten sich aus Analysen von Arbeitssituation und Stoffdaten ab. Die Kombination der Parameter ergibt die Bewertung der jeweiligen Arbeitssituation als Ergebnis der Beurteilung.

4.4 Informationsermittlung und -strukturierung: Arbeitssystem-Modell

Das Modell des Arbeitssystems stellt eine Gedankenstruktur zur Identifizierung und zielorientierten Erfassung von Beurteilungsparametern der Arbeitsbedingungen dar. Dazu erfolgt eine Untergliederung in sog. Arbeitssystemelemente [2, 14, 15].

Die Gedankenstruktur des Arbeitssystems ist über die prinzipielle Festlegung der Arbeitssystemelemente hinaus nicht näher spezifiziert bzw. festgelegt, so dass eine gefährdungsspezifische Anpassung erfolgen muss. Dies bietet für ein stoffspezifisches Gesamtverfahren die Möglichkeit zur weiteren Untergliederung der Elemente mit den erforderlichen Eingangsparametern der berücksichtigten Modelle, die eine vollständige Beschreibung benötigt. Zu diesen zählen auch die Umgebungs- sowie die tätigkeitsspezifischen und arbeitsorganisatorischen Rahmenbedingungen.

In die Betrachtungen müssen somit verschiedene charakteristische Parameter der allgemeinen Raum- und Tätigkeitsbedingungen integriert werden, die sich aus den Bereichen der Arbeitsplatzgeometrie, der thermodynamischen und strömungsmechanischen Umgebungsbedingungen sowie der zeitbezogenen Arbeitsorganisation, aufgeführt in Anhang A, Tab. A.9, zusammensetzen. Darüber hinaus muss zur vollständigen Erfassung der Arbeitssituation die Eingliederung der Eingangsgrößen der verschiedenen Berechnungsmodelle erfolgen können, so dass die Analyse der Verwendungsmöglichkeit auch die in den Kap. 4.1 und 4.2 vorgestellten Größen auf

die Einordnung in die verschiedenen Arbeitssystemelemente umfasst. Eine vollständige Kategorisierung aller potentiellen Eingangsgrößen (geometrische und thermodynamische Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen, Größen der Arbeitsorganisation, Eingangsparameter der möglichen Modellansätze) in die zur Verfügung stehenden Arbeitssystemelemente führt zu der in Anhang B, Tab. B.12 aufgezeigten Zusammenfassung, die sich auf die zentralen Parameter⁷⁹ der Modelle bezieht⁸⁰.

Die Flexibilität des Arbeitssystem-Modells ermöglicht die Analyse und zusammenfassende Darstellung der Rahmenbedingungen unterschiedlicher Tätigkeiten. Dabei können die verschiedenen Einflüsse und Eingangsgrößen, die für verwendete Modelle erforderlich sind, den vorgeesehenen Arbeitssystemelementen zugeordnet und methodisch kategorisiert werden. Die erfassten Daten stehen auf dieser Grundlage als Überblick für einzelne Betrachtungsschritte und Modellanwendungen zusammengefasst zur Verfügung.

Die Zuordnung der Rahmenbedingungen und Eingangsgrößen zu einzelnen Arbeitssystemelementen erzielt eine Konkretisierung der allgemeinen Struktur. Dabei ist die Berücksichtigung aller modellspezifischen Parameter des Gesamtverfahrens und deren Kategorisierung möglich, so dass sich eine abschließende Systematisierung benötigter Eingangsgrößen ergibt. Aus dieser abschließenden Darstellung in Anhang C resultiert eine methodische Abfrage zur Eruiierung aller erforderlichen Parameter. Die Tätigkeitsbeschreibung stellt die Parameter zur Verwendung in den nachfolgenden Modulen bzw. Berechnungen bereit.

Das Arbeitssystem-Modell kann unter Berücksichtigung der dargestellten Untergliederung und Konkretisierung der Systemelemente zur Analyse der unterschiedlichen Arbeitsbedingungen einer Tätigkeit als Teil eines stoffspezifischen Gesamtverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung Verwendung finden. Die Eingliederung als erster methodischer Schritt des Verfahrens ist möglich, aus der unmittelbar - bei geeigneter Feststellung bzw. Abschätzung der relevanten Eingangsgrößen - die Bereitstellung der für die Modellansätze notwendigen Datensätze entsteht. Die erforderlichen Parameter verknüpfen die Informationsermittlung mit den anschließenden rechnerischen Betrachtungen, die in allen folgenden Schritten auf die festgestellten Eingangsgrößen zurückgreifen.

Entsprechend der unterschiedlichen Rahmenbedingungen, die sich einerseits auf den Ausgangszustand des Stoffes, andererseits auf verschiedene konkrete Anwendungsgrenzen bzw. physikalische Vorgänge beziehen, muss ein Teil des Gesamtverfahrens der angepassten Auswahl anzuwendender Modelle dienen. Die Zusammenfassung aller Parameter im Arbeitssystem eignet sich daher zur Ableitung einer Auswahlsystematik. Dazu ist die Ergänzung der aufgeführten Größen um den ursprünglichen Aggregatzustand, aus dem sich unterschiedliche physikalische Abläufe ergeben bzw. ausschließen, sowie die modellspezifischen Anwendungsbedingungen (z.B. Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche bei Verdunstungsvorgängen) erforderlich⁸¹. Die Kombination mit den übrigen zur Verfügung stehenden Eingangsgrößen eignet sich zur unmittelbaren Modellauswahl. Weiterhin können ggf. aus der Übersicht der Rahmenbedingungen bereits an dieser Stelle potentielle Erfordernisse oder Ansatzpunkte von Schutzmaßnahmen abgeleitet werden (bspw. bei hohen Stoff- oder Umgebungstemperaturen).

⁷⁹ Die Benennung der verschiedenen Eingangsgrößen erfolgt zur allgemeinen Anwendung, so dass sich ggf. begriffliche Unterschiede und Überschneidungen zu den benannten Modellparametern ergeben können (vgl. [14, 15]).

⁸⁰ Die unterschiedlichen Modelle, insbesondere der Ausbreitungsrechnung, können weitere Eingangsgrößen erfordern, die aus den angewandten Berechnungskonzepten (z.B. als standardisierte Annahmen) resultieren. Diese sind an dieser Stelle zunächst nicht aufgeführt, da lediglich ein Bezug zu den infrage kommenden Modellen erfolgt (vgl. Tab. 4.2). Eine vollständige Übersicht zeigt Anhang C, weitere Ausführungen zu den jeweiligen Parametern erläutert Kap. 5.

⁸¹ Die vollständige Erörterung weitergehender Parameter erfolgt - begründet auf den konkreten Erfordernissen einzelner Modelle - in Kap. 5, so dass an dieser Stelle darauf verzichtet wird.

4.5 Anmerkungen zu kleinskaligen Verwirbelungen

Kleinskalige Verwirbelungen von Stoffen in Arbeitsräumen können durch verschiedene Effekte hervorgerufen werden. Ursachen sind sowohl Bewegungen von Menschen und Maschinen als auch u.a. geringfügige Luftabströmungen (bspw. Maschinenabluft), die im Rahmen der Betriebsabläufe innerhalb des Arbeitsraumes auftreten. Im Allgemeinen sind die entstehenden Konzentrationsveränderungen auf geringe Bereiche beschränkt und weisen keinen Einfluss auf die übergeordneten Verhältnisse des gesamten Raumes auf. Es ergeben sich keine weitläufigen Strömungen, sondern lediglich örtlich begrenzte Verwirbelungen, die in diesen Bereichen zu lokalen Konzentrationsunterschieden führen.

Da die Verwirbelungen zumeist nicht auf statistisch erfassbaren bzw. regelmäßigen, geführten und gleichmäßig verlaufenden Bedingungen, sondern vielmehr auf willkürlichen Ereignissen im Raum beruhen (z.B. Personenbewegungen während der Tätigkeiten), ist eine Erfassung und Beschreibung lediglich eingeschränkt möglich. Die Ermittlung kann nur dann erfolgen, wenn die Ereignisse in Anzahl und Stärke bekannt sind, z.B. bei konstanter Luftführung an Betriebsmitteln. Ist dies der Fall, beschreiben strömungsmechanische oder verfahrensspezifische Parameter (z.B. Druck, Geschwindigkeit) die Bedingungen. Kann eine genaue Analyse der Ereignisse nicht stattfinden, so müssen Effekte, die sich auf kleine Teilbereiche eines Raumes beziehen, vernachlässigt werden. Insbesondere Personenbewegungen zählen zu diesen Vereinfachungen.

Kapitel 5

Entwicklung eines Konzepts: Wuppertaler Expositions-Abschätzung

Die stoffbezogene Gefährdungsbeurteilung beinhaltet unterschiedliche methodische Schritte, um die Arbeitsbedingungen zu ermitteln und im Gesamten in die Analyse und Bewertung einzubeziehen. Einen konkreten Ablauf der Gefährdungsbeurteilung nach GefStoffV benennt TRGS 400 "Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen" [40]. Für inhalative Gefährdungen konkretisiert TRGS 402 "Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition" [41] das Vorgehen. Beim Einsatz von Berechnungen zur Gefährdungsbeurteilung müssen die unterschiedlichen Betrachtungsschritte mit Modellen geeignet und einzelfallspezifisch untersetzt werden. Abb. 5.1 fasst die erforderliche Schrittfolge eines rechnerischen Gesamtverfahrens zusammen.

Den generellen Rahmen bildet eine Struktur zur Ermittlung der Rahmenbedingungen und Eingangsgrößen (Informationsermittlung). Auswahl und Anwendung von Berechnungsmodellen werden zur Darstellung der stofflichen Emission und Ausbreitung bzw. zur Expositionsbeschreibung Beschäftigter (Analyse der Arbeitssituation) erforderlich, die auf den abschließenden Bewertungsschritt hinführen. Der modulare Aufbau des im Anschluss konzeptionell abgeleiteten und vorgestellten rechnerischen Gesamtverfahrens der "Wuppertaler Expositions-Abschätzung" (WEA) gibt diese allgemeine Abfolge wieder. Die Module charakterisieren gleichzeitig die konzeptionellen Arbeitsschritte. Die gewählte Einteilung umfasst Module

- zur Informationsermittlung,
- zur Erfassung der Stoffemission,
- zur Erfassung der Stoffausbreitung und
- zur Bewertung der Arbeitsbedingungen.

Die Grundanforderung an die konzeptionellen Verknüpfungen der Module ist die Ermöglichung der fortlaufenden Verwendung von Zwischenergebnissen, aber auch ggf. notwendiger Rückkopplungen von Modellkonzepten untereinander. Die Validierung bzw. Plausibilitätsprüfung der verwendeten Eingangsparameter sowie der (Zwischen-) Ergebnisse erfolgt bei der Ermittlung bzw. im Fortlauf des Verfahrens mit dem Ziel, ggf. aufgetretene Berechnungsfehler systematisch zu erkennen.

Die nachfolgende Detaillierung der Module mit den in Kap. 4 bewerteten Modellen für die stoff- und tätigkeitsspezifische Beurteilung inhalativer Gefährdungen durch gasförmige Stoffe stellt die grundsätzliche methodische Konzeption und deren Begründung dar. Die für die Anwendung erforderlichen Rahmenbedingungen und die notwendigen Verknüpfungen zwischen den Modulen bzw. einzelnen Modellen werden aufgezeigt bzw. konzipiert und somit ein geschlossenes

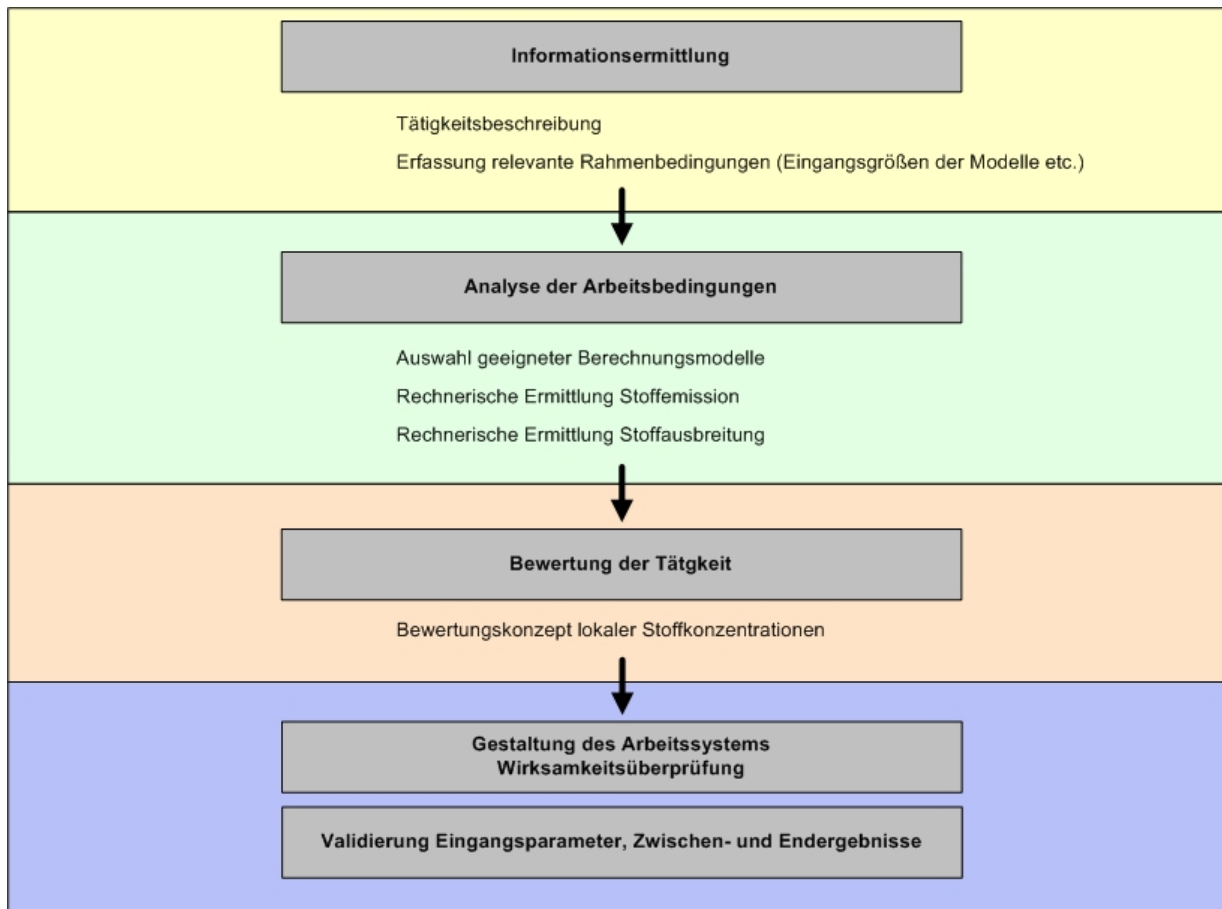


Abbildung 5.1: Schrittfolge zur Gefährdungsbeurteilung nach GefStoffV mit Berechnungsmodellen (basierend auf [41]) [7]

Gesamtverfahren vorgeschlagen. Ziel ist, dass die WEA den Anforderungen der GefStoffV (vgl. Kap. 2.1.4) an eine qualifizierte Expositionsabschätzung entspricht und die in Kap. 6 angeführten Validierungsuntersuchungen die Anwendungsmöglichkeit nachweisen.

5.1 Modul 1: Informationsermittlung

5.1.1 Erfassung und Strukturierung der Arbeitssituation

Die realitätsnahe Betrachtung von Tätigkeiten erfordert die Ermittlung und Strukturierung der unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Größen, die in die verschiedenen Modelle der anschließenden Betrachtungsschritte einfließen. Da die Modelle z.T. eine Vielzahl an Parametern - insbesondere für die Ausbreitungsberechnung mittels FDS (vgl. Kap. 5.3) - berücksichtigen, sollten diese als Ergebnis der Informationsermittlung zur Verfügung stehen. Die dadurch vorab durchgeführte Zusammenfassung der Eingangsgrößen stellt deren Vollständigkeit und Einheitlichkeit in allen Verwendungen sicher.

Das Modell des Arbeitssystems eignet sich zur Erfassung aller erforderlichen Rahmenbedingungen, sofern die Konzeption - in Abstimmung auf die verwendeten Berechnungsmodelle - eine abschließende Konkretisierung der unterschiedlichen Arbeitssystemelemente vornimmt (vgl. Diskussion in Kap. 4.4). Diese Zusammenstellung muss alle Rahmenbedingungen des Arbeitsraumes und vorhandener Betriebsmittel, der Umgebungsatmosphäre, der Tätigkeit, des verwen-

deten Stoffes sowie der Arbeitsorganisation umfassen. Die Parameterermittlung bildet die zwingend erforderliche Grundlage zur Anwendung der Berechnungsmodelle zur Stoffemission und -ausbreitung sowie zur Bewertung der Arbeitsbedingungen mit Bezug auf die räumlich-zeitliche Koinzidenz von Luftkonzentrationen und Beschäftigten als geschlossenes und abgestimmtes Gesamtverfahren.

Die Konkretisierung der Arbeitssystemelemente beruht auf den Eingangsgrößen der innerhalb der WEA Berücksichtigung findenden Berechnungsmodelle, die die nachfolgenden Kap. 5.2 bis Kap. 5.4 aufzeigen. Die Eingangsgrößen werden in die Systematik der Arbeitssystemelemente übernommen und dadurch kategorisiert. Die Größen dienen der Beschreibung

- der inhärenten, gefährlichkeitsbestimmenden Stoffeigenschaften ("Hazard", vgl. Abb. 1.1);
- der übrigen Stoffeigenschaften, die Einfluss auf den Stofftransport haben oder in Berechnungsmodellen (ggf. als Anwendungsgrenzen) Berücksichtigung finden (z.B. Aggregatzustand vor Emission, vgl. Kap. 5.1.2);
- eines stoffspezifischen Grenzwerts, gebildet durch den AGW - sofern vorhanden - oder ersatzweise anderweitige Konzepte;
- von anderen Bewertungsmaßstäben (z.B. Vergleiche unterschiedlicher Rahmenbedingungen zur Identifizierung der günstigsten Verhältnisse), wenn kein Grenzwert zur Verfügung steht;
- der Umgebungsbedingungen der Tätigkeit als grundlegender Rahmen (z.B. Raumgeometrie und -temperatur) und
- der organisatorischen Rahmenbedingungen ("Exposition", vgl. Abb. 1.1).

Neben der reinen Datenerfassung zielt die Ermittlung bereits auf die Prüfung der Einhaltung von Anwendungsgrenzen bzw. den Ausschluss des Einsatzes außerhalb des Verwendungsbereichs (z.B. bei Emission von Partikeln) samt einer situationsspezifischen Modellauswahl ab.

Die abschließende Konkretisierung der Arbeitssystemelemente mit allen erforderlichen Größen und Rahmenbedingungen führt Anhang C auf. Das Arbeitssystem stellt als vollständiges Hilfsmittel zur Informationsermittlung den Eingangsschritt der Ablaufsystematik der WEA dar, auf den die weiteren Module wiederholt Bezug nehmen. Die einmalige, gesamte Erfassung aller Eingangsgrößen zu Verfahrensbeginn gewährleistet einerseits, dass alle Bedingungen tatsächlich erfasst und einheitlich zur Verfügung stehen. Andererseits werden so wiederholende Ermittlungsschritte vermieden, so dass allen weiteren Betrachtungsschritten einheitliche Werte zugrunde liegen.

5.1.2 Parameter zur tätigkeitsspezifischen Modellauswahl

Die WEA soll verschiedene Modelle zur Beschreibung der Stofffreisetzung umfassen, die sich durch die Berücksichtigung bzw. Ausrichtung auf unterschiedliche Stofftransportvorgänge unterscheiden und insgesamt einen Modellpool zur Emissionsermittlung bilden (vgl. Kap. 5.2). Darüber hinaus bestehen für die enthaltenen Verdunstungsmodelle unterschiedliche Anwendungsbereiche bzw. -grenzen, die zu einer in Kap. 5.2.3 erörterten tätigkeits- bzw. situationsbezogenen Modellauswahl führen. Eine angemessene Modellauswahl unter Berücksichtigung der Ausrichtung und Anwendungsgrenzen ist für realitätsnahe Ergebnisse und damit detaillierte Beurteilungen notwendig.

Kap. 5.1.1 stellt die Verwendung des Arbeitssystems zur umfassenden Informationsermittlung und -bereitstellung zu Beginn der WEA vor. Auf Basis der erfassten bzw. ermittelbaren Größen

aufbauend soll eine Entscheidung erfolgen, welche konkreten Berechnungsmodelle in den weiteren Betrachtungsschritten innerhalb ihrer Verwendungsbedingungen einsetzbar bzw. welche Modellanwendungen nicht möglich sind. Dementsprechend ist die Identifizierung und Nutzung vorgangs- und modelltypischer Größen notwendig, die auf die jeweilige Anwendbarkeit schließen lassen. Dies erfolgt einerseits bereits durch zu berücksichtigende Eingangsgrößen, die aufgrund der Modellkonzeption im Arbeitssystem enthalten sind, andererseits aber auch vor dem Hintergrund zusätzlicher, nicht für Rechenschritte erforderlicher Parameter als Verweis auf bestehende Anwendungsgrenzen. Die nachfolgend erläuterten, modellcharakteristischen Größen ergänzen daher das in Anhang C konkretisierte Arbeitssystem, so dass eine vollständige Systematik zur Datenerfassung und Modellauswahl entsteht. Der Berücksichtigung liegen verschiedene Erwägungen zugrunde:

- (Flächenbezogener) Massen- bzw. Volumenstrom der Stofffreisetzung (sofern aus anderen Betrachtungen bekannt, ggf. mit ergänzenden Parametern):
Möglichkeit zur unmittelbaren Durchführung der Ausbreitungsrechnung ohne Verwendung eines Emissionsmodells ggf. nach Ermittlung aus verbundenen Parametern (vgl. [15], Gl. 1 und [5, 71]) mit Bezug auf die vorhandene Emissionsfläche;
- Aggregatzustand:
Ausweisung Primärzustand des Gefahrstoffs zur Konkretisierung möglicher Emissionsvorgänge;
- Emissionsart (sofern unmittelbar bekannt):
Möglichkeit zur direkten Auswahl eines Modelltyps der Emission bzw. Ausschluss der Anwendung der WEA bei Emission als Flüssigkeit oder Feststoff;
- Charakterisierung von Flüssigkeiten als Reinstoff oder Gemisch:
Unterscheidung der Anwendungsbereiche von Verdunstungsmodellen, Darstellung des Erfordernisses selektiver Betrachtungen bzw. Berücksichtigung verschiedener Komponenten;
- Flüssigkeitstemperatur in Relation zur stoffspezifischen Siedetemperatur:
Unterscheidung der Emissionsvorgänge (und somit -modelle) zur Verdunstung und Verdampfung;
- Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Flüssigkeitsoberfläche:
Charakterisierung des Anwendungs- bzw. Gültigkeitsbereichs der Verdunstungsmodelle;
- Sublimationsmöglichkeit von Feststoffen:
Möglichkeit des Phasenübergangs von Feststoffen durch Sublimation als Anwendungsvoraussetzung des Sublimationsmodells;
- Feststofftemperatur in Relation zur stoffspezifischen Sublimationstemperatur:
Feststellung des Sublimationsvorgangs als Anwendungsbedingung des Sublimationsmodells.

Die daraus folgende Systematik führt Kap. 5.2.5 auf, wobei die Abgrenzung der im Rahmen der WEA berücksichtigten Modelle die Grundlage bilden. Die Konkretisierung des Arbeitssystems ist nunmehr eine abgeschlossene Aufzählung der - sofern möglich - zu erfassenden Rahmenbedingungen von Tätigkeiten, die innerhalb der WEA zur Anwendung kommt. Können Parameter bei der praktischen Anwendung nicht ermittelt werden, muss eine geeignete Abschätzung (z.B. aus Literatur- oder Erfahrungswerten) durch den Anwender erfolgen.

5.2 Modul 2: Erfassung der Stoffemission

Aus den in Kap. 4 aufgeführten Beurteilungen von Emissionsmodellen, die Tab. 4.1 zusammenfasst, wird die weitere Berücksichtigung verschiedener Ansätze abgeleitet. Die in die WEA einbezogenen Modelle der Stofffreisetzung werden in einem Modellpool zusammengeführt, aus dem in der Anwendung eine einzelfallbezogene Modellauswahl erfolgt. Der Modellpool umfasst die nachfolgend aufgeführten Ansätze, deren konkrete strukturelle Einbindung in den Verfahrensablauf im Anschluss dargestellt wird:

- Unmittelbare Abschätzung von Emissionen (vgl. Kap. 4.1.1),
- Modell zur Gas-Emission aus Behältern (vgl. Kap. 4.1.2),
- Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu (vgl. Kap. 4.1.5),
- Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling (vgl. Kap. 4.1.6),
- Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell (vgl. Kap. 4.1.7).

Die Berücksichtigung der Modelle zur Stofffreisetzung beinhaltet mit Ausnahme der unmittelbaren Abschätzung von Emissionen methodische Erweiterungen zur Erfassung und Wiedergabe zeitabhängiger Eingangsgrößen. Neben der in den Erläuterungen aufgezeigten Methodik bzw. den entsprechenden ergänzenden Berechnungsschritten setzt eine Tabellenkalkulation die jeweiligen Modelle zur zeitabhängigen Verwendung um. Deren Konzeption sieht die entsprechenden Berechnungen in den in der weiteren Diskussion angesprochenen Zeitschritten vor, die im Einsatzfall der Anwender festlegt.

5.2.1 Unmittelbare Abschätzung von Emissionen

Sofern die Informationsermittlung feststellt, dass bereits Kenntnisse über die stoffliche Freisetzung (z.B. aus Messungen) vorliegen, werden diese unmittelbar als Eingangswerte der Ausbreitungsrechnungen verwendet. Weiterhin kann eine unmittelbare Annahme der entsprechenden Eingangsgrößen durch den Nutzer erfolgen oder notwendig sein, die auf realitätsbezogenen Erkenntnissen, ggf. mit Sicherheitsfaktoren, beruht (bspw. wenn die Rahmenbedingungen Emissionsberechnungen ausschließen).

Die abzuschätzenden Größen ergeben sich aus den Eingangsgrößen des Modells zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens (vgl. Kap. 5.3.2):

- Flächenbezogener Massenstrom in $[kg/(s m^2)]$ bzw. flächenbezogener Volumenstrom in $[m^3/(s m^2)]$ und Stoffdichte in $[kg/m^3]$ (zur Umrechnung) oder
- Emissionsgeschwindigkeit in $[m/s]$ (ggf. der Gesamtströmung) in Verbindung mit der
- Emissionsfläche in $[m^2]$.

Diese Parameter bilden gleichzeitig die Verknüpfungspunkte zwischen den Berechnungen zur Stoffemission und -ausbreitung, die bei der Informationsermittlung mit Hilfe des konkretisierten Arbeitssystems zur direkten Weiterverwendung qualifizieren (siehe Kap. 5.2.5). Bei Ermittlung oder Annahme der Parameter ist eine Berechnung zur Stoffemission obsolet.

5.2.2 Modell zur Gas-Emission aus Behältern

Die Berücksichtigung des strömungsmechanischen Modells dient der Berechnung von Gas-Emissionen aus Behältern. Die Anpassungen fokussieren auf die Betrachtung von Behälter-Emissionen der entsprechenden Fluide [14, 15, 69, 72]. Als Ergebnisgröße berechnet das Modell den Massenstrom der Ausströmung in $[kg/s]$, der durch Normierung auf die zugehörige Emissionsfläche den Verknüpfungspunkt zur Berechnung der Stoffausbreitung bildet. Ursprünglich umfassen die Modellgleichungen die stationäre Betrachtung der Ausströmung ohne zeitliche Veränderungen infolge der Leerung des Behälters. Die notwendige Berücksichtigung des instationären Emissionsverlaufs erfordert daher eine konzeptionelle Ergänzung. Die Unterscheidung von Gleichungen für unter- und überkritische Strömungen macht ebenfalls eine Erweiterung notwendig.

Für Ausströmungen aus Behältern ist der Innendruck eine wesentliche Einflussgröße auf den resultierenden Massenstrom. Da mit der Leerung des Behälters über die Betrachtungszeit hinweg eine Druckverringerung eintritt, resultiert eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Ausstroms. Gleichermaßen nimmt die innerhalb des Behälters befindliche Stoffmasse ab, so dass sich ebenfalls die Gasdichte⁸² verringert. Die zeitabhängige Druckentwicklung wird durch Verwendung der idealen, massebezogenen Gasgleichung⁸³

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (5.1)$$

eingebunden; für die Annahmen eines gleichbleibenden Behältervolumens, unveränderter molarer Masse sowie einer isothermen Ausströmung umgestellt zu

$$\frac{p}{m} = \textit{konstant}. \quad (5.2)$$

Dieses Verhältnis stellt die Bedingungen von aufeinanderfolgenden Zeitschritten gegenüber bzw. ermöglicht die Ableitung der Parameter aus dem vorhergegangenen Zeitpunkt. Bei bekanntem Behältervolumen, Anfangsdruck und -masse kann mithilfe der mathematischen Rekursion, die auf die Ermittlung von Eingangsparametern eines Zeitpunkts t_i aus den Ergebnissen des vorherigen Betrachtungszeitpunkts t_{i-1} abzielt, eine zeitabhängige Druckentwicklung⁸⁴ ermittelt werden. Dazu werden insbesondere die Ergebnisse der zeitabhängigen Massenströme der vorherigen Zeitpunkte herangezogen. Die vorhandene Stoffmasse wird aus der Anfangsmasse und der abgeströmten Masse je Betrachtungsschritt zurückberechnet:

$$p(t_i) = \frac{p(t_{i-1}) \cdot \dot{m}(t_{i-1}) \Delta t}{m(t_{i-1})} [Pa] \quad (5.3)$$

Analog erfolgt die rekursive Ermittlung des zeitabhängigen Dichteverlaufs innerhalb des Behälters⁸⁵:

$$\rho(t_i) = \frac{m(t_{i-1}) - \dot{m}(t_{i-1}) \cdot (\Delta t)}{V_B} [kg/m^3] \quad (5.4)$$

⁸² Aufgrund der Vorhaltung von Gasen in Behältern unter Druck ist diese höher als die stoffspezifische Gasdichte unter Umgebungsbedingungen bzw. im "entspannten" Zustand. Es besteht eine unmittelbare Druckabhängigkeit.

⁸³ Parameter der Darstellung: p = Druck des Gases $[Pa]$, V = eingenommenes Gasvolumen $[m^3]$, m = Stoffmasse $[g]$, M = Molare Masse des Stoffes $[g/mol]$, R = Allgemeine Gaskonstante $(Pa \cdot m^3)/(mol \cdot K)$, T = absolute Stofftemperatur $[K]$.

⁸⁴ Parameter der Darstellung: $p(t_i)$ = Behälter-Innendruck zum Betrachtungszeitpunkt i $[Pa]$, $p(t_{i-1})$ = Behälter-Innendruck zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt $i-1$ $[Pa]$, $\dot{m}(t_{i-1})$ = Emissions-Massenstrom aus Behälter zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt $i-1$ $[g/s]$, Δt = Zeitschrittweite zwischen den Betrachtungszeitpunkten i und $i-1$ $[s]$, $m(t_{i-1})$ = Masse innerhalb des Behälters zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt $i-1$ $[g]$.

⁸⁵ Parameter der Darstellung: $\rho(t_i)$ = Dichte innerhalb des Behälters zum Betrachtungszeitpunkt i $[kg/m^3]$, $m(t_{i-1})$ = Masse innerhalb des Behälters zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt $i-1$ $[g]$, $\dot{m}(t_{i-1})$ = Emissions-Massenstrom aus Behälter zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt $i-1$ $[kg/s]$, Δt = Zeitschrittweite zwischen den Betrachtungszeitpunkten i und $i-1$ $[s]$, V_B = Behältervolumen $[m^3]$.

Die aufgeführten zeitabhängigen Eingangsgrößen ermöglichen je Zeitpunkt die Berechnung des Emissions-Massenstroms. Dabei wird die Unterscheidung des unterkritischen vom überkritischen Zustand durch die zeitpunktbezogene Überprüfung des Übergangskriteriums mithilfe der zeitabhängigen Parameter (vgl. Gl. 5.3 und Gl. 5.4) beachtet, wonach die entsprechende Gleichung zum Einsatz kommt. Weiteres Kriterium ist der zeitabhängige Druckvergleich, wobei eine Unterschreitung des Umgebungsdrucks durch den Behälterdruck die Fortentwicklungsrechnung beendet.

Das Modell der Fluid-Emission integriert die Einflüsse der Öffnungsgeometrien über einen Beiwert. Zur Weiterverwendung der Ergebnisse im Rahmen der Ausbreitungsberechnungen muss der ermittelte Massenstrom auf die tatsächliche Emissionsfläche bezogen werden; es ergibt sich ein normierter Massenstrom der Stofffreisetzung. Dessen Einbindung in die Ausbreitungsrechnung erfordert keine weitere Korrektur, es kann eine unmittelbare Einbindung des flächenbezogenen Massenstroms erfolgen.

Durch die Einbindung der rekursiven Ermittlung von Eingangsparametern untergliedert sich die Berechnung des Emissions-Massenstrom in diskrete Zeitschritte und erfolgt nicht kontinuierlich. Die Zeitschrittweite bestimmt die Genauigkeit der Berechnungen mit. Bei geringen Zeitabständen schätzt die Rekursion einen nahezu kontinuierlichen Verlauf der resultierenden Massenströme ab, so dass diese möglichst klein durch den Anwender festgelegt werden sollten.

5.2.3 Verdunstungsmodelle

Aus Kap. 4 stehen für die Berechnung von Verdunstungsvorgängen zwei geeignete Modellkonzepte zur Verfügung. Diese beziehen variierende Bedingungen ein und weisen dementsprechend voneinander abweichende Anwendungsgrenzen auf, aus denen sich die einzelfallbezogene Auswahl für den Einsatz ableitet:

- Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu:
Betrachtung der Verdunstung von Reinstoffen bei Überströmungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeitsoberfläche zwischen 0,00 m/s und 6,70 m/s;
- Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling:
Betrachtung der Verdunstung von Reinstoffen oder Stoffgemischen bei Überströmungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeitsoberfläche zwischen 0,20 m/s und 0,70 m/s;

Zur Einbindung der Konzeptionen in die WEA bedarf es der nachfolgend modellbezogen aufgeführten Auswahlkriterien und Verknüpfungspunkte. Generell ist zunächst jedoch die Feststellung erforderlich, ob eine Emission durch den Übergang von der Flüssig- in die Gasphase im Wesentlichen auf der Verdunstung beruht. Dementsprechend muss die Auswahlsystematik nachprüfen, ob die Flüssigkeitstemperatur unterhalb der stoffspezifischen Siedetemperatur liegt bzw. diese im Laufe der Betrachtungen aufgrund der Erwärmung durch Umgebungseinflüsse überschreitet. Zur Überprüfung der zeitlichen Entwicklung der Flüssigkeitstemperatur bzw. der möglichen Überschreitung des Siedepunkts benötigt das Vorgehen eine entsprechende Vorbetrachtung. Innerhalb des Ausbreitungsmodells FDS ermöglicht die Anordnung einer Oberfläche mit gleichen thermodynamischen Eigenschaften an der entsprechenden Position bei Verzicht auf eine Stofffreisetzung die Feststellung der Temperaturentwicklung (vgl. Kap. 5.3.2). Anhand der Definition eines Messpunkts zur Dokumentation des Temperaturverlaufs innerhalb der Oberfläche ermittelt das Modell den Einfluss der Umgebungsbedingungen und schätzt den Übergang der Verdunstung in die Verdampfung für die Wahl eines Emissionsmodells ab.

In den Verdunstungsmodellen nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling stellt die

sog. Verdunstungstemperatur einen Eingangsparameter dar. Der Wert bezeichnet die Flüssigkeitstemperatur und gibt deren Einfluss auf die Verdunstungsgeschwindigkeit bzw. den einhergehenden -massenstrom wieder. Da die Flüssigkeitstemperatur sich mit nur wenigen Ausnahmen (z.B. bei gezielter Beheizung eines Behälters) nicht bzw. nur unerheblich von den Umgebungsbedingungen unterscheidet, kann i.A. die in die Berechnungen eingehende Verdunstungstemperatur gleich der vorherrschenden Raumtemperatur gesetzt werden [83].

5.2.3.1 Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu

Aus der Konzeption des Modells, das aus Experimenten bei Variation der Luftgeschwindigkeiten über der Flüssigkeitsoberfläche abgeleitet wurde, resultiert die Anwendungsbeschränkung auf Reinstoffe und Überströmungsgeschwindigkeiten der Flüssigkeitsoberfläche zwischen 0,00 m/s und 6,70 m/s [14, 15, 74, 75]. Für diesen Bereich erfolgt eine Berücksichtigung im Modellpool des Moduls zur Erfassung der Stoffemission. Die begrenzenden Parameter (Aggregatzustand, Charakterisierung als Reinstoff oder Gemisch und Überströmungsgeschwindigkeit) sieht die in Anhang E dargestellte Auswahlmethodik zur eindeutigen Abgrenzung der Verwendungsmöglichkeit vor.

Das Modell ermöglicht die unmittelbare Ermittlung eines flächenbezogenen Emissions-Massenstroms in $[g/(cm^2 s)]$, der unter Berücksichtigung der Einheitenkonvention des Ausbreitungsmodells auf $[kg/(m^2 s)]$ in dieses als Eingangsparameter übertragen werden kann. Die Verknüpfung macht die Berücksichtigung eines Anpassungsfaktors notwendig:

$$\frac{10.000 \text{ cm}^2/\text{m}^2}{1.000 \text{ g/kg}} = 10 \text{ (kg} \cdot \text{cm}^2)/(\text{g} \cdot \text{m}^2) \quad (5.5)$$

Das Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu ist als stationärer, nicht-zeitabhängiger Berechnungsansatz konzipiert. Eingangsgrößen, die an Arbeitsplätzen ggf. wesentlichen zeitabhängigen Veränderungen unterliegen, sind die Überströmungsgeschwindigkeit der Flüssigkeitsoberfläche und die Verdunstungs- bzw. Umgebungstemperatur (z.B. durch Veränderung der Raumlüftung). Eine konzeptionelle Ergänzung des Modells bezieht die Zeitabhängigkeit der Flüssigkeitsverdunstung ein:

Die Berücksichtigung variierender Geschwindigkeiten und Temperaturen führt unmittelbar zu einer instationären Berechnung. Eine Möglichkeit dazu ist die Annahme der Parameter für unterschiedliche Zeitschritte. Andernfalls schätzt eine Anwendung des Ausbreitungsmodells entsprechend der Erläuterung in Kap. 5.3.3 - in Abhängigkeit der einzelfallbezogenen, konkreten Rahmenbedingungen - die Strömungsbedingungen ab. Dies geschieht durch Vorbetrachtungen ohne die Vorgabe einer Stofffreisetzung bei Verwendung der Raumbedingungen, wobei oberhalb der Flüssigkeit die Geschwindigkeit durch entsprechend ausgerichtete Messstellen erfasst wird. Gleichzeitig zur Temperaturentwicklung innerhalb der Flüssigkeit kann der Temperaturverlauf über der Oberfläche zeit- und umgebungsabhängig festgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Vorberechnungen ermöglichen durch deren Verwendung als Eingangsgröße die Berechnung der zeitabhängigen Stoffemission, deren Abschätzungen wiederum in die vollständige Ausbreitungsberechnung eingehen.

5.2.3.2 Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling

Zur Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten der WEA um Betrachtungen von Verdunstungsvorgängen von Stoffgemischen bezieht das Modul zur Ermittlung der Stofffreisetzung das Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling ein. Neben der Berechnungsmöglichkeit zu Reinstoffen und Stoffgemischen ist dieses auf Überströmungsgeschwindigkeiten zwischen 0,20 m/s und 0,70 m/s ausgerichtet, die als Merkmal in die Auswahlmethodik (vgl. Anhang E) eingehen. Die Ergebnisse des Verfahrens müssen jedoch vor einer weitergehenden Verwendung für

Ausbreitungsbetrachtungen auf die Fläche der Emission bezogen werden, so dass sich ebenfalls ein normierter Massenstrom ergibt. Aufgrund der Größenkonvention zwischen Emissions- und Ausbreitungsberechnung mit einer Umrechnung von $g/(h \cdot m^2)$ auf $kg/(s \cdot m^2)$ beträgt der Anpassungsfaktor für dieses Verdunstungsmodell:

$$\frac{1}{(1.000 \text{ g/kg}) (3.600 \text{ s/h})} = (kg \cdot h)/(3.600.000 \text{ g} \cdot s). \quad (5.6)$$

Analog zum Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu (vgl. Kap. 5.2.3.1) kann die Zeitabhängigkeit des Emissions-Massenstroms im Rahmen des Modellkonzepts nach Weidlich und Gmehling ebenfalls über die Eingangsgrößen der Überströmungsgeschwindigkeit und der Verdunstungs- (Flüssigkeits-) bzw. Umgebungstemperatur dargestellt werden. Gleichmaßen besitzt die Möglichkeit zur abschätzenden Vorbetrachtung anhand des Ausbreitungsmodells mit Fokus auf die Ermittlung ortsbezogener Geschwindigkeiten und Temperaturen Gültigkeit, die als Rückkopplung zur Erfassung des Emissions-Massenstroms genutzt werden.

5.2.4 Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell

Überschreitet die Flüssigkeitstemperatur den stoffspezifischen Siedepunkt, so tritt die Verdampfung als Phasenübergang auf. In stoffspezifischen Sonderfällen geht die feste unmittelbar in die gasförmige Phase durch Sublimation über, sofern es zur Überschreitung des Sublimationspunkts kommt. Zur Unterscheidung der Vorgänge und Identifizierung des maßgeblichen Emissionsvorgangs erfolgt daher im Rahmen der in das Arbeitssystem implementierten Auswahlsystematik die Feststellung, ob es sich bei dem betrachteten Stoff um eine Flüssigkeit oder einen Feststoff handelt und ob eine Überschreitung der Siedetemperatur (bei Flüssigkeiten) bzw. des Sublimationspunkts (bei Feststoffen und genereller Möglichkeit) vorliegt.

Zur Berücksichtigung beider Vorgänge integriert das Modul das theoretische Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodell in den Modellpool und die Auswahlsystematik. Die Stofftransportvorgänge werden dabei alleine durch die Verwendung der Verdampfungs- bzw. der Sublimationsenthalpie in die Abschätzung unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung aus der Umgebung unterschieden. Die Korrelation ermittelt den Emissions-Massenstrom in $[kg/s]$, der bei Normierung auf die emittierende Oberfläche im Rahmen der anschließenden Ausbreitungsberechnung unmittelbar Verwendung findet [14, 15, 71, 77].

Das theoretisch basierte Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodell bezieht als Umgebungsbedingung die Wärmeübertragung in die Emissionsberechnung ein, die Strömungsbedingungen bleiben unberücksichtigt. Da die Wärmeübertragung eine Zusammenfassung der zeitabhängigen Vorgänge der Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung aus der Umgebung auf die Flüssigkeit mit entsprechenden Rahmenparametern (z.B. Umgebungstemperatur, Temperatur und Abstand von Objekten zur Oberfläche, Strömungsgeschwindigkeit etc.) darstellt, ist eine Ermittlung von zeitabhängigen Variationen innerhalb des Betrachtungszeitraums erforderlich. Voraussetzung der Anwendung des Modells ist daher eine konzeptionelle Ergänzung, welche den Wärmeaustausch mit der Umgebung abschätzt.

Die Summe der Wärmeübertragungen aus der Umgebung - innerhalb des Modells durch die Wärmestromdichte als alleiniger Parameter zusammengefasst - hängt von den konkreten, einzelfallbezogenen Rahmenbedingungen ab, die nicht überschlägig (z.B. durch einfache Handrechenverfahren) abschätzbar sind. Die Anwendung des Modells macht daher ebenfalls Vorbetrachtungen notwendig, welche die Wärmestromdichte als Gesamtgröße der unterschiedlichen Wärmeübertragungsvorgänge unmittelbar auf der Flüssigkeits- bzw. Feststoffoberfläche ermitteln. Konzeptionell wird das Ausbreitungsmodell FDS unter Verwendung aller thermodynamischen Rahmenbedingungen herangezogen, das eine ortsbezogene Erfassung der Wärmestromdichte

ermöglicht (vgl. Kap. 5.3.3). Diese Vorbetrachtungen erfolgen analog dem Einsatz bei Verdunstungsmodellen ohne Durchführung einer Ausbreitungsberechnung, so dass sich die zeitabhängigen Wärmestromdichten ermitteln lassen. Deren Berücksichtigung ermöglicht die Anwendung der (zeitabhängigen) Berechnung der Stofffreisetzung durch Verdampfung oder Sublimation.

5.2.5 Systematik zur Modellauswahl

Bei der Berechnung der Stoffemission sind die Anwendungsgrenzen verwendeter Modelle zu beachten. In Abhängigkeit zu den Rahmenbedingungen und den verschiedenen Stofftransportvorgängen erfolgt innerhalb der WEA die situationsbedingte Modellauswahl aus den berücksichtigten Ansätzen. Die Betrachtung unterschiedlicher Eingangsgrößen ermöglicht die Entscheidung für ein Emissionsmodell aus dem Modellpool.

Die Auswahl umfasst neben dem Aggregatzustand, der über die generelle Modellanwendbarkeit bzw. -kategorie entscheidet, die unterschiedlichen Modellausrichtungen und -grenzen, um einen Vergleich mit den konkreten Rahmenbedingungen der Stoffemission zu führen. Anhand der Übereinstimmung von konkreten Eingangsgrößen und Anwendungsgrenzen ergibt sich somit ein Abbild, welche Modelle für die Emissionsberechnungen Verwendbarkeit besitzen. Sofern Vorgaben zur Emission aus anderweitigen Untersuchungen, Abschätzungen oder Annahmen vorliegen, verzichtet das Verfahren auf die Gegenüberstellung.

Über die unterschiedlichen Modellkonzepte hinweg sind die Anwendungsbedingungen und -grenzen an verschiedene Parameter gekoppelt. Aus diesen ergeben sich die nachstehenden Faktoren als Bedingungen zur Modellauswahl:

- Aggregatzustand:
Ermittlung der Anwendbarkeit der WEA sowie Festlegung der Modellkategorie der Emission;
- Sublimationsmöglichkeit Feststoff:
Entscheidungskriterium des generellen Auftretens der Sublimation bei flächigen Feststoffen;
- Verhältnis Feststofftemperatur zur Sublimationstemperatur:
Entscheidungskriterium zum Ablauf einer Sublimation bei flächigen Feststoffen;
- Primärzustand Flüssigkeit als Lache:
Feststellung der Anwendbarkeit der Verdunstungs- und Verdampfungsmodelle für Flüssigkeitsoberflächen;
- Verhältnis der Flüssigkeitstemperatur zur Siedetemperatur:
Entscheidung zwischen den Vorgängen der Verdunstung oder Verdampfung;
- Unterscheidung Flüssigkeit als Reinstoff oder Stoffgemisch:
Entscheidungskriterium verschiedener Verdunstungsmodelle;
- Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Flüssigkeitsoberfläche:
Beschränkung Anwendungsbereich der Verdunstungsmodelle.

Die Entscheidung über die Eignung unterschiedlicher Modelle basiert auf Erfassung und Gegenüberstellung der kennzeichnenden Eingangsgrößen mit den Anwendungsbedingungen. Wenn eine Ermittlung mit Vorbetrachtungen notwendig ist, werden diese unter Berücksichtigung der geometrischen und thermodynamischen Rahmenbedingungen wie in Kap. 5.3.3 dargestellt durchgeführt. Die Gegenüberstellung von Rahmenbedingungen bzw. Anwendungsgrenzen und vorliegenden Eingangsgrößen erfolgt gemäß Anhang E in Form eines tabellarischen Vergleichs,

der unmittelbar mögliche Differenzen bzw. Entsprechungen aufzeigt. Eine Spalte führt die tätigkeitsbedingten Verhältnisse auf, weitere Spalten benennen die jeweiligen Modellgrößen, die eine Anwendung zulassen. Die Gegenüberstellung führt in Verbindung mit dem in Abb. 5.2 aufgezeigten Entscheidungsbaum auf die eindeutige Festlegung eines Emissionsmodells bzw. auf den Ausschluss einer Emissions-Berechnung hin.

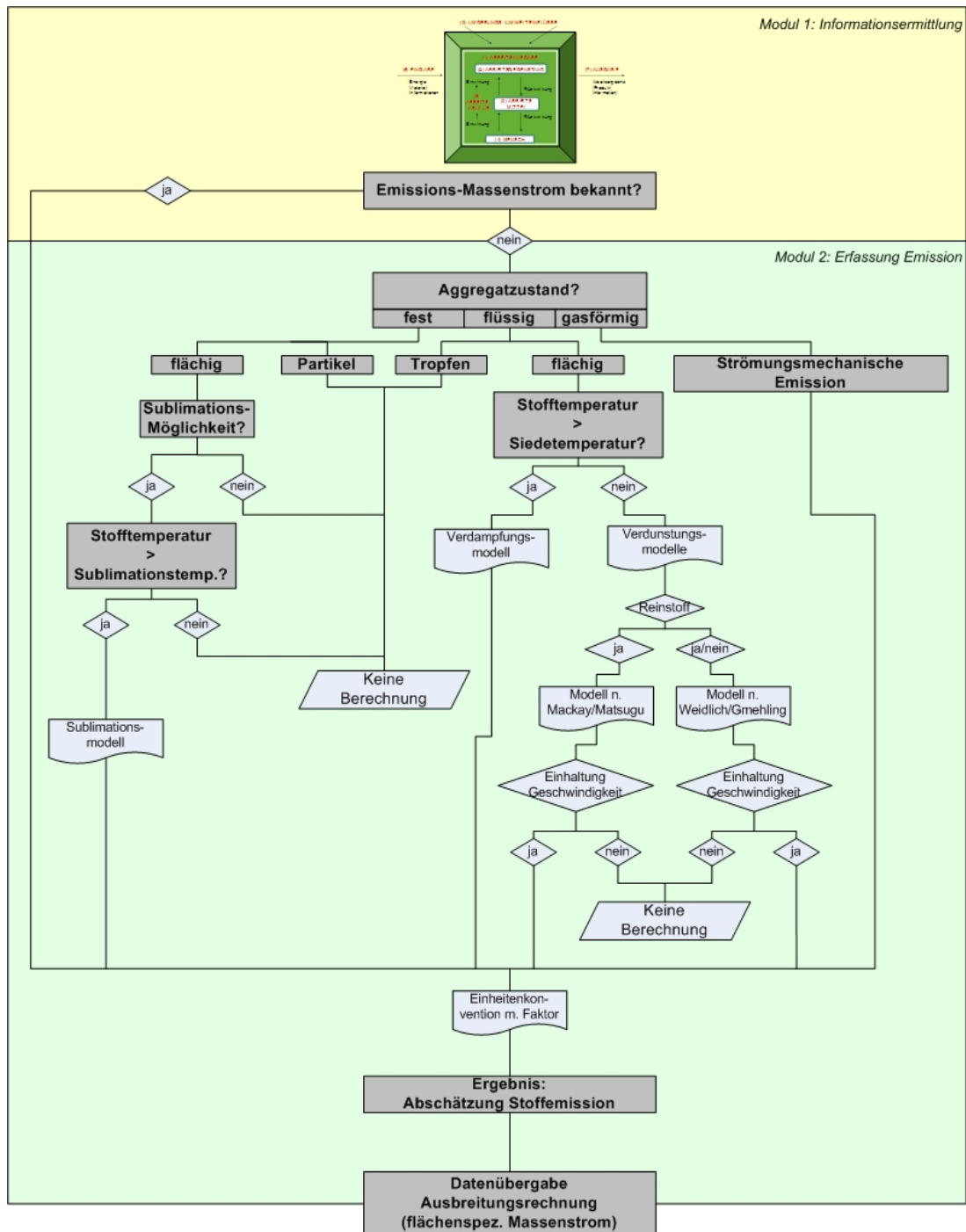


Abbildung 5.2: Entscheidungsbaum zur Modellauswahl der Stoffemission [7]

Die verschiedenen Modelle weisen teilweise spezifische Eingangsgrößen auf, deren Erfassung lediglich für die konkrete Anwendung notwendig wird. Ist eine Verwendung nicht möglich bzw. erforderlich, können diese Parameter im Zuge der Informationsermittlung vernachlässigt werden.

Der Entscheidungsbaum verdeutlicht, dass der Aggregatzustand den Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet. Bei bekanntem Aggregatzustand schließen sich jeweils unterschiedliche Modelle unmittelbar aus, was zur Vereinfachung der Informationsermittlung führt. Im Anschluss erbringt die weitergehende Identifizierung Parameter zur Modellauswahl, die in weiten Teilen ebenfalls Eingang in die Berechnungen finden. Um die Informationsermittlung zu vereinfachen, sind für die unterschiedlichen Modelle in Abhängigkeit zum Aggregatzustand innerhalb des angepassten Arbeitssystems in Anhang C die spezifischen Größen farblich gekennzeichnet: Parameter, die allgemein erforderlich werden, weisen dabei keine Kennzeichnung auf. Die Verdunstungs- und Verdampfungsmodelle sind zusammengefasst, da die Parameter für die Vorbetrachtungen der Berechnungen entsprechend Kap. 5.3.3 erforderlich werden.

5.2.6 Anmerkungen zur Berücksichtigung ergänzender Emissionsmodelle

Bei der Aufstellung der WEA als Gesamtverfahren zur Beurteilung inhalativer Gefährdungen für Beschäftigte durch Gase handelt es sich um ein generelles Konzept. Die aufgeführten Modelle zur Berücksichtigung im Modellpool innerhalb des Moduls dienen an dieser Stelle der beispielhaften Darstellung der erforderlichen Maßnahmen zur Integration und Modell- bzw. Modulverknüpfung.

Die Darstellung bildet keinen abgeschlossenen Katalog, der die Verwendung anderer Modelle zur Emissionsberechnung ausschließt. Vielmehr soll der Modellpool der zielorientierten Erweiterung offenstehen. Voraussetzung zur Einbindung anderer Konzepte ist zunächst die Möglichkeit zur Korrespondenz der Ergebnisse der Emissionsrechnungen mit den Eingangsparametern des abgeschlossenen Ausbreitungsmodells. Zur Verbindung der Emissions- und Ausbreitungsrechnungen können dabei - wie beispielhaft aufgeführt - Faktoren zur Anpassung unterschiedlicher Einheiten erforderlich sein. Soll eine zeitabhängige Einbindung erfolgen, muss weiterhin untersucht und festgelegt werden, inwieweit die Abschätzung erforderlicher Parameter durch modulübergreifende Verknüpfungen (z.B. Vorbetrachtungen mit Hilfe des Ausbreitungsmodells) realisierbar ist.

5.3 Modul 3: Erfassung der Stoffausbreitung

An die Ermittlung der Stofffreisetzung schließt innerhalb der Analyse der Arbeitsbedingungen das Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung an. Dieses berechnet modellbasiert und auf Grundlage der Angaben aus dem Arbeitssystem sowie der ermittelten Stofffreisetzung zeit- und ortsabhängige Luftkonzentrationen. Die Anwendung unterscheidet Berechnungen, welche die generelle Ermittlung der Rahmenbedingungen der Stoffemission und -ausbreitung als Vorbetrachtungen ermöglichen, von den eigentlichen Ausbreitungsrechnungen:

Zur Durchführung von Berechnungen mit dem Modell FDS - sowohl als Vorbetrachtungen als auch als Ermittlung ortsbezogener Stoffkonzentrationen - ist die Feststellung erforderlich, ob eine unmittelbare Vorgabe der Stofffreisetzung erfolgt oder ob diese rechnerisch ermittelt wird. Sofern alle Emissionsparameter vorliegen bzw. angenommen werden, erfolgt die Berechnung der Stoffausbreitung unmittelbar. Das Erfordernis von Vorbetrachtungen leitet sich dagegen aus der Anwendung der verschiedenen Emissionsmodelle ab.

Die Berechnung der ortsabhängigen Stoffkonzentrationen soll auf die Gesamtheit der unterschiedlichen Stofftransportvorgänge abzielen. Daher wird im Gegensatz zur Abschätzung der

Stoffemission kein Modellpool, sondern eine geschlossene Vorgehensweise zur Modellanwendung festgelegt. Eine Auswahlssystematik anzuwendender Modelle ist dementsprechend nicht erforderlich.

5.3.1 Vorbetrachtung zur Stoffausbreitung: Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs

Das Modell zur Betrachtung der dichtebedingten Stoffausbreitung beinhaltet keine Möglichkeit zur Ableitung von orts- und zeitabhängigen Massenströmen bzw. Stoffkonzentrationen. Dennoch erfolgt eine Berücksichtigung, um bereits im Vorfeld detaillierter Betrachtungen zur Konzentrationsermittlung ggf. Rückschlüsse auf kritische Bereiche und Vorzugsrichtungen der Ausbreitung abzuleiten:

Die Abschätzung beruht auf dem Vergleich der molaren Massen bzw. der zeit- und ortsabhängigen Dichten des emittierten Stoffes mit der Umgebung. Daraus leitet sich ab, ob die Ausbreitung eines gasförmigen Gefahrstoffs nach der Freisetzung vertikal Richtung Decke oder Boden tendiert. Gleichermäßen erfolgt eine Abschätzung, ob sich aufgrund der sich höhenabhängig verändernden Dichte der Umgebung ggf. eine Zwischenschicht bildet.

Die Ermittlung der dichtebedingten vertikalen Ausbreitungsrichtung stellt zu Beginn der Ausbreitungsbetrachtungen fest, an welchen Stellen im Raum möglicherweise signifikante Luftkonzentrationen auftreten. Da die eigentlichen Ausbreitungsrechnungen ggf. sehr aufwendig sind und die Berechnungsdauer mit der Anzahl an Messpunkten, die über den Betrachtungsraum verteilt werden, zunimmt⁸⁶, bereitet die Betrachtung die zielorientierte Gesamtuntersuchung vor. Die Ergebnisse liefern somit Erkenntnisse zur Festlegung der Untersuchungsbereiche, allerdings werden Einflüsse durch Strömungen innerhalb des Raumes nicht beachtet.

Die Anwendung des Modells zur dichtebedingten Stoffausbreitung dient somit als Vorbetrachtung der Ausbreitungsrechnung. Aufgrund der erzielbaren qualitativen Aussagen ist keine Anbindung an anderweitige Modelle zur Stoffemission erforderlich, gleichermäßen werden im Hinblick auf die Bewertung der jeweiligen Tätigkeit keine Stoffkonzentrationen ermittelt. Die erforderlichen Parameter zur Modellanwendung stellt unmittelbar das Arbeitssystem zur Verfügung, wobei die Dichten des Emitienten sowie der Umgebung über die Höhe des Betrachtungsraumes relevant sind.

Da das Konzept Luftströmungen innerhalb des Raumes, die zur Beeinflussung der Stoffausbreitung führen können, nicht beachtet, muss eine anderweitige Berücksichtigung falsche Annahmen kritischer Bereiche minimieren. Dazu können die - u.a. für Betrachtungen zur Stoffemission erforderlichen - Vorbetrachtungen zur Strömungsentwicklung durch die thermodynamischen Rahmenbedingungen herangezogen werden. Der Vergleich der Ergebnisse beider Ansätze ist erforderlich, der die ortsabhängige Überschneidung der vertikalen Vorzugsrichtung und vorhandener Strömungen innerhalb des Raumes analysiert. Bei einer Interaktion ist davon auszugehen, dass Verknüpfungen und Beeinflussungen zwischen beiden Ausbreitungsvorgängen resultieren. Dementsprechend verbietet sich die Annahme kritischer Bereiche von zeit- und ortsabhängigen Luftkonzentrationen allein aufgrund eines Stofftransportvorgangs ohne ergänzende Untersuchungen in horizontalen und vertikalen Vorzugsrichtungen. Weiterhin dürfen die Vorbetrachtungen nicht dazu führen, dass Messpunkte allein in den (vermuteten) kritischen Bereichen angeordnet werden. Gleichermäßen sind Kontrollpunkte in anderen Bereichen erforderlich. Die Untersuchungen liegen somit lediglich der ggf. erforderlichen Detaillierung eines Bereichs zugrunde.

⁸⁶ Ergänzungen von Messpunkten verändern die Ausbreitungsrechnungen nicht, es tritt jedoch ein zusätzlicher Zeit- und Speicherbedarf auf [12].

5.3.2 Berechnung der Stoffausbreitung: Methodische Übertragung des Brandschutzingenieurmodells FDS

Berechnungsmodelle des Arbeitsschutzes zur Beschreibung der (gasförmigen) Stoffausbreitung weisen verschiedene Ansatz- und Schwachpunkte auf: Zonenmodelle lassen lediglich die Ermittlung von Stoffkonzentrationen als volumenbezogene Mittelwerte zu, so dass nicht von ortsabhängig realitätsgetreuen Ergebnissen auszugehen ist. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur unmittelbaren Einflussnahme durch den Anwender. Das Diffusionsmodell und die Strahlgesetze bieten lediglich eingeschränkte Perspektiven auf ausgewählte Ausbreitungsvorgänge, die anderweitig überlagert sein können. Eine Möglichkeit zur vollständigen Ausbreitungsbetrachtung unterschiedlicher, gleichzeitig verlaufender Vorgänge bieten diese Ansätzen nicht (vgl. Kap. 4.2.1, Kap. 4.2.2 und Kap. 4.2.3, zusammengefasst in Tab. 4.2 [14, 15]).

Gegenüber brandschutztechnischen Zonenmodellen, die aufgrund ihrer konzeptionellen Anlage nicht für Betrachtungen der Stoffausbreitung ohne Unterstellung eines Brandereignisses geeignet sind und daher nicht in die WEA einbezogen werden (vgl. Kap. 4.2.6), bestehen diese Möglichkeiten für Feld- bzw. CFD-Modelle. Für die Anwendung des Modells FDS können die vorhandenen Modellansätze zur Ermittlung der Stoffausbreitung genutzt werden, ohne dass ein Brandereignis unterstellt werden muss (vgl. Kap. 4.2.7 [11, 12, 14, 15]). Die WEA bindet daher das Modell FDS als alleiniges, geschlossenes Konzept zur Ermittlung der Ausbreitung gasförmiger Stoffe ein. Dieser Berechnungsansatz schließt auch die Bildung von Freistrahlen sowie die Ausbreitung durch Diffusion ein, was den Verzicht auf die singulären Modelle innerhalb dieses Moduls begründet. Eine Auswahlstrategie wie für die Emissionsmodelle (vgl. Kap. 5.2.5) ist somit - auch durch den Bezug auf die gasförmige Stoffausbreitung - nicht notwendig.

Die Verwendung nimmt eine methodische Übertragung des Modells FDS aus Anwendungen des Brandschutzes in Arbeitsschutz-Betrachtungen vor, die Kap. 4.2.7 begründet: Die Argumentation geht darauf ein, dass durch die modellinterne Verwendung der numerischen Strömungsmechanik, basierend auf Lösung der angepassten Navier-Stokes-Gleichungen, alle relevanten Transportvorgänge der luftgetragenen Stoffausbreitung in einem geschlossenen Konzept abgebildet und unter gegenseitiger Beeinflussung wiedergegeben werden. Über die Berechnung der Stoffausbreitung hinaus sind weitere Betrachtungen, insbesondere zu auftretenden Strömungs- und Temperaturentwicklungen innerhalb des Betrachtungsraumes, durchführbar.

Die Modellanwendung erfordert die Erfassung und Einbindung einer Vielzahl von Eingangsparametern (geometrische, strömungsmechanische und thermodynamische Rahmenbedingungen). Das Modul zur Informationsermittlung erfasst und stellt diese mit Hilfe des angepassten Arbeitssystems für die Parametrisierung der Berechnungen bereit. Ebenso muss - entweder als Annahme oder als Ergebnis rechnerischer Emissionsbetrachtungen - ein flächenbezogener Emissions-Massenstrom des betrachteten Stoffes vorliegen, der somit den Verknüpfungspunkt zu vorgelagerten Ansätzen darstellt (vgl. Modul zur Erfassung der Stoffemission, Kap. 5.2 und Kap. 5.5). Die Konstruktion des Modells FDS macht darüber hinaus die Festlegung verschiedener Berechnungs- und Steuerparameter erforderlich, die das Modellverhalten während des Berechnungsverlaufs definieren. Zur Verwendung des Modells für Arbeitsschutz-Betrachtungen zur Gefahrstoffausbreitung wird die nachstehende Arbeitsweise vorgeschlagen, die in Form von Arbeitsschritten ebenso in Anhang D samt den entsprechenden Befehlsstrukturen dargestellt ist [12]:

Grundlage der stoffbezogenen Ausbreitungsrechnung ist die Festlegung des Gesamtvolumens, welches durch das Modell als virtueller Berechnungsraum berücksichtigt werden soll. Die Festlegung erfolgt über die Definition von Länge, Breite und Höhe in Verbindung mit der Anzahl der Kontrollvolumen je Kantenmaß, aus der sich deren Gesamtanzahl ergibt. Während für brandspezifische Betrachtungen in [12] ein Hinweis zur Bestimmung der Kantenlängen der Kontrollvolumen besteht, kann dieser für Berechnungen ohne Brandereignis nicht verwendet werden, da ein

Bezug auf die Wärmefreisetzungsrates des Brandes besteht. Die Festlegung der Zellgrößen muss aus Erfahrung des Anwenders bzw. in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Berechnungskapazitäten erfolgen, wobei für kleinere Kantenlängen i.A. genauere und detailliertere Ergebnisse zu erwarten sind. Einstellungen zur Betrachtungsdauer der Berechnungen und Verwendung zusätzlicher Untermodelle (z.B. Verzicht auf Lösung der Transportgleichung zur Wärmestrahlung) orientieren sich an den Rahmenbedingungen der jeweiligen Tätigkeit.

Grundsätzliche Rahmenbedingungen mit Einfluss auf die Ausbreitung bzw. deren Berechnung sind die Geometrie des betrachteten Arbeitsraumes, vorhandene Öffnungen (Fenster, Türen etc.), die raumluftechnischen Anlagen sowie Einrichtungsgegenstände und Arbeitsmittel. Modellintern erfolgt die Darstellung von Umfassungsbauteilen und Strömungshindernissen (Boden, Wände, Decke, Versprünge etc.) sowie der Einrichtung über die Anordnung von Objekten und ggf. Aussparungen, um die Geometrie des Betrachtungsraums nachzuempfinden. Vorhandene Öffnungen in den Umfassungsbauteilen ins Freie oder zu Nebenräumen definieren Aussparungen. Für die unterschiedlichen Objekte bzw. ihre Oberflächen sind darüber hinaus jeweils die Bauteile und Baustoffe, aus denen diese bestehen, sowie die Materialeigenschaften (thermodynamische Dicke⁸⁷, Dichte, spezifische Wärmeleitfähigkeit und -speicherkapazität, Oberflächentemperatur) festzulegen⁸⁸ und zuzuweisen. Gleiches gilt für vorhandene Arbeitsmittel mit besonderen Eigenschaften, wie z.B. gegenüber der Umgebung erhöhte Oberflächentemperaturen. Auf den Umfassungsbauteilen oder anderen Objekten angeordnete Flächen, denen Strömungsgeschwindigkeiten (in Normalrichtung) oder Volumenströme und eine räumliche Anordnung zugewiesen sind, beschreiben raumluftechnische Anlagen bzw. die Zu- und Abluftführung von Arbeitsmitteln. Der Personenaufenthalt bildet eine wesentliche Rahmenbedingung der Tätigkeit. Der menschliche Körper kann über die Anordnung von Objekten, die Kopf, Torso und Beine repräsentieren, an typischen Aufenthaltsorten Beschäftigter modelliert werden. Die Berücksichtigung des menschlichen Energieumsatzes und der Wärmeemission kann jedoch nicht durch Angabe der flächenbezogenen Wärmefreisetzung entsprechend DIN EN ISO 8996 [84] erfolgen, da das Modell für diesen Fall von einem Brandereignis ausgehen würde. Analog zur Bauteilcharakterisierung werden den körperdarstellenden Objekten daher Oberflächentemperaturen zugewiesen, die auf Hauttemperaturen bzw. Temperaturen auf der Außenseite der Kleidung beruhen. Gegenstand von Forschungsarbeiten zu klimatischen Bedingungen und Belastungen von Beschäftigten bildeten bislang Oberflächen- bzw. Hauttemperaturen unterschiedlicher Körperregionen für wechselnde Belastungen von unbedeckten Personen, die sich nicht unmittelbar zur Ableitung von Eingangsgrößen übertragen lassen [85, 86]. Zur allgemeinen Verwendung ohne zusätzliche Untersuchungen werden daher Oberflächentemperaturen von

- 37°C für den Kopf,
- 35°C für den Torso sowie
- 30°C für die Beine

vorgeschlagen und in der Konkretisierung des Arbeitssystems in Anhang C vermerkt. Bei der Durchführung von Ausbreitungsrechnungen muss die einhergehende thermische Beeinflussung der unmittelbaren Umgebung, die sich auf den Stofftransport in diesem Bereich auswirken kann,

⁸⁷ Das Modell FDS ermöglicht neben der strömungsmechanischen Betrachtung die Ermittlung des Wärmeübergangs auf Bauteile, wobei zwischen deren Dicke als Strömungshindernis (Definition des Objektes) und der sog. thermodynamischen Dicke zur Beachtung innerhalb der Wärmebilanzierungen unterschieden wird. Der Wärmetransport in Bauteilen ist an dieser Stelle nicht relevant, die Eingangsparameter sind jedoch zur Modellverwendung erforderlich.

⁸⁸ Gemäß [11, 12] haben diese Parameter keinen unmittelbaren Einfluss auf den Stofftransport, wirken sich allerdings auf die Umgebungsbedingungen durch Wärmeaustausch mit der Raumluft aus. Da i.d.R. jedoch keine kurzfristig großen Temperaturunterschiede (im Gegensatz zu Brandfällen) zu erwarten sind, genügt eine grobe Parameterabschätzung.

beachtet werden. Dabei erfolgt tendenziell eine Überschätzung des stofflichen Auftriebs, im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung ergibt sich hieraus ein vergrößerter Stofftransport in Richtung des Atembereichs von Personen, der zu höheren ortsbezogenen Konzentrationen bzw. im Weiteren zu erhöhten (berechneten) Expositionen Beschäftigter führt. Können für konkrete Arbeitssituationen genauere Werte - in Abhängigkeit zu klimatischen Bedingungen, zu Arbeitsschwere und Körperhaltung - abgeschätzt werden (z.B. mittels Thermographie), bleibt die Erfassung und Verwendung in Arbeitssystem und Ausbreitungsrechnung möglich.

Neben der Temperatur bilden Größe und Oberfläche von Personen einen Einflussfaktor auf die resultierende Wärmeemission. Darüber hinaus beeinflusst die Körpergröße die Position des Atembereichs. Da die genauen Körperabmessungen bei präventiven Betrachtungen i.d.R. nicht zur Verfügung stehen, erfolgt eine allgemeine Abschätzung, die im Einzelfall bei einer Anwendung des Modells angepasst werden kann: DIN 33402, Teil 2 [87] tabelliert u.a. die menschliche Körperhöhe in Perzentilen sowie in Abhängigkeit zum Geschlecht. Grundsätzlich resultiert aus einer größeren Körperhöhe eine Zunahme von Oberfläche und Wärmeemission. Da Geschlecht und Alter unbekannt sind, werden die jeweiligen Werte des 95. Perzentsils der Körperhöhe im Altersbereich zwischen 18 und 65 Jahren⁸⁹ für Männer (1,855 m) und Frauen (1,720 m) gemittelt, aus denen sich ein Wert von 1,7875 m ergibt. Um der demographischen Verteilung des Beschäftigtenalters in Verbindung mit der genäherten Einteilung der Gitterstruktur des Ausbreitungsmodells (z.B. in 0,05 m-Schritten) Rechnung zu tragen, wird diese Mittelung weiter auf 1,75 m pauschalisiert. Die Angaben im konkretisierten Arbeitssystem nehmen ohne weiteren, einzelfallbedingten Nachweis die in Tab. 5.1 aufgeführten Körperabmessungen an. Die freie Körperoberfläche, die innerhalb des Ausbreitungsmodells in direktem Kontakt zur Umgebungsluft steht, beträgt pauschal 1,7775 m².

Körperteil	Länge	Breite	Höhe
Kopf	0,15 m	0,10 m	0,20 m
Torso	0,15 m	0,40 m	0,60 m
Beine	0,15 m	0,35 m	0,95 m

Tabelle 5.1: Pauschale Abschätzung menschlicher Körpermaße im Modell FDS

Für instationäre Rahmenbedingungen ist die Einbindung der zeitabhängigen Veränderungen erforderlich. Insbesondere Öffnen oder Schließen von Fenstern und Türen, sich ändernde Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Volumenströme der Zu- und Abluftführung sowie wechselnde Aufenthaltsorte von Personen erfordern die Berücksichtigung. Bei der Modellparametrisierung ist die Angabe prozentualer Anteile grundlegender Größen von Zu- und Abluft zu verschiedenen Zeitpunkten möglich, zwischen denen der Verlauf linear interpoliert wird. Für Objekte kann die An- bzw. Abwesenheit zu Betrachtungsbeginn als Zustand definiert werden, der sich an einem festgelegten Zeitpunkt verändert. Die Objekte werden zum entsprechenden Zeitpunkt der Berechnung dem Berechnungsraum hinzugefügt oder entfernt, so dass eine Zustandsveränderung das Öffnen und Schließen von Öffnungsverschlüssen (z.B. Türen) bzw. den Personenaufenthalt (Bewegung über verschiedene Aufenthaltsorte bzw. Anordnungspunkte) darstellt.

Neben den geometrischen Rahmenbedingungen und der Arbeitsorganisation sind die stofflichen Bedingungen zu charakterisieren. Hierzu zählen einerseits der betrachtete Stoff (inhärente Eigenschaften ohne tätigkeitsspezifische Emissionsparameter), andererseits die Zusammensetzung und Eigenschaften der Umgebungsluft innerhalb des Berechnungsraums. Für die Definition von unterschiedlichen Stoffen, die entweder während der Tätigkeit emittiert oder als Komponente der Umgebungsluft eingehen sollen, verfügt das Modell über eine interne Datenbank mit verschiedenen Elementen und Verbindungen (z.B. Wasserstoff, Stickstoff, Helium, Ethanol, Umgebungsluft in Normzusammensetzung etc.) samt Stoffeigenschaften. Für

⁸⁹ Dies entspricht dem Altersbereich, in dem i.d.R. einem Beschäftigungsverhältnis nachgegangen wird.

andere Komponenten müssen die Stoffeigenschaften durch den Anwender definiert werden. Aus allen charakterisierten Stoffen folgt im Anschluss die Angabe der Zusammensetzung der Umgebungsatmosphäre, sofern diese von üblicher Umgebungsluft als modellbasiertem Standardwert abweicht. Ebenso ist die Festlegung von Umgebungstemperatur und -druck zu Betrachtungsbeginn sowie der relativen Luftfeuchtigkeit möglich. In diesem Zuge lassen sich Hintergrundkonzentrationen des freigesetzten Stoffes (z.B. infolge vorhergehender Tätigkeiten oder ubiquitärer Belastungen) darstellen. Analog ist die massenbezogene Zusammensetzung des emittierten Stoffstroms anzugeben.

Über die Stoffeigenschaften hinaus legen weitere Eingangsgrößen, die sich maßgeblich auf das tätigkeitsbedingte Freisetzungsverhalten beziehen, die Stoffemission fest. An dieser Stelle ist die Verknüpfung mit den Ergebnissen der vorgelagerten Emissionsbetrachtungen erforderlich: Die Definition von Oberflächen mit entsprechenden Strömungseigenschaften und die Einbindung der zuvor charakterisierten Stoffeigenschaften in das Ausbreitungsmodell dient dessen Parametrisierung: Tritt eine unmittelbare gasförmige Stofffreisetzung auf, wird entweder die Geschwindigkeit der Einströmung (in Normalrichtung der Oberfläche) oder der Gesamtmassenstrom definiert. Die Massenanteile der Komponenten konkretisieren bei Bedarf die stoffliche Zusammensetzung der Zuströmung. Ergänzend dazu bzw. bei zuvoriger Anwendung eines Emissionsmodells erfolgt die Charakterisierung der Emission über die Vorgabe eines flächenbezogenen Massenstroms in $kg/(s m^2)$, der in Verbindung mit der Ausdehnung der Fläche den Emissions-Massenstrom definiert. Dazu wird ebenfalls die Vorgabe eines Massenanteils der betrachteten Stoffe innerhalb der Strömung erforderlich, so dass ebenfalls die gleichzeitige Betrachtung verschiedener Komponenten erfolgt. Emissions-Massenströme aufgrund eines Phasenübergangs durch Verdunstung, Verdampfung oder Sublimation in den gasförmigen Aggregatzustand werden in gleicher Weise, ggf. als Ergebnisse von Emissions-Berechnungen unter Verwendung von Anpassungsfaktoren entsprechend Kap. 5.2 und Kap. 5.5 umgesetzt.

Berechnungsergebnisse zur Stoffausbreitung sind Ausgabewerte zu zeit- und ortsabhängigen Stoffkonzentrationen in $[kg/m^3]$, die FDS als quantitative Daten in Form einer Ergebnisdatei dokumentiert und für weitere, bspw. statistische, Betrachtungen zur Verfügung stellt. Die berechneten Konzentrationswerte sind somit unmittelbar die Schnittstelle zum abschließenden Bewertungsschritt. Die Dokumentation der ortsbezogenen Stoffkonzentrationen erfolgt nur bei Definition von Messpunkten an den relevanten Positionen im Betrachtungsraum (bspw. Atembereiche der Beschäftigten) während der Parametrisierung. Methodisch macht es Sinn, die Ergebnisse über die gesamte Betrachtungsdauer (unabhängig von Aufenthaltsdauern) zu erfassen, so dass anhand des vollständigen Datensatzes ggf. Variationen der tatsächlichen Einwirkungs-dauern von Stoffen auf Beschäftigte angestellt werden können. Zusätzlich besteht unter Verwendung des ebenfalls durch NIST, USA veröffentlichten Programms "Smokeview" die Möglichkeit, unterschiedliche Berechnungsergebnisse (zeitabhängige Entwicklung von z.B. Stoffkonzentrationen, Temperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten etc.) als qualitative Visualisierungen darzustellen. Die Darstellung bezieht sich auf in unterschiedlichen Ebenen der Raumrichtungen ausgewertete Größen (sog. Slice-Ebenen), aber auch auf die dreidimensionale Entwicklung von Schwellenwerten (sog. Isosurface-Darstellung) [88, 89]. Analog zu quantitativen Messpunkten erfordert die Nutzung und Auswertung eine Festlegung der Ebenen bzw. Schwellenwerte zu betrachtender Größen im Rahmen der Parametrisierung des Modells. Anhand der Visualisierungen, die mit veränderlichen Skalen versehen werden können, ist jedoch keine detaillierte quantitative Auswertung gegeben, so dass deren Nutzung auf Ergänzungen oder pauschale Identifizierung von kritischen Bereichen, auf vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Gestaltungsvarianten oder auch auf weitergehende Verdeutlichungen der Konzentrationsverhältnisse (z.B. im Rahmen der Unterweisung von Beschäftigten) begrenzt bleibt. Neben den verschiedenen Ergebnisgrößen der Betrachtungen (Stoffkonzentrationen, aber z.B. auch Geschwindigkeits- und Temperaturentwicklungen) ermöglichen die unterschiedlichen Auswertungsmöglichkeiten eine Kontrolle der

parametrisierten Bedingungen des Raumes, indem die Parametrisierung z.B. Dokumentationen zur Stofffreisetzung oder zu auftretenden Strömungsbedingungen der mechanischen Luftführung umfasst. Die Auswertungen dienen im Anschluss ggf. Plausibilitätsprüfungen oder möglicherweise erforderlichen Fehlerermittlungen (vgl. Kap. 5.6).

Die Parametrisierung umfasst zusätzliche Informationen bzw. Festlegungen zur Steuerung der Berechnungen, die über die im Vorfeld ermittelbaren Größen und Bedingungen des Betrachtungsraums und der untersuchten Tätigkeit - im Arbeitssystem erfasst und dokumentiert - hinausgehen. Diese erforderlichen Berechnungsparameter müssen durch den Anwender anhand der Erkenntnisse der Informationsermittlung schlussgefolgert⁹⁰ und nachgehalten werden. Insbesondere die Festlegung der notwendigen Betrachtungsdauer, die prinzipiell beliebig lang⁹¹ möglich ist, benötigt eine entsprechend begründete Ableitung (z.B. Beschränkung auf tatsächliche Emissionszeiträume oder charakteristische Phasen der Arbeitsabläufe). Die Berechnungen müssen durch den Anwender umfassend dokumentiert werden, wozu die Angaben des Arbeitssystems herangezogen werden. Darüber hinaus werden ebenfalls die Kontrollparameter⁹² erfasst, um eine Nachvollziehbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten. Die Angaben des Arbeitssystems sollten zur Vollständigkeit der Dokumentation um folgende Aspekte als gesonderte Erfassung⁹³ ergänzt werden:

- Bezeichnung der Berechnungen mit eindeutigen (Datei-) Namen zur späteren Identifizierung der Berechnungsläufe,
- Berechnungsvolumen, Anzahl Kontrollvolumen und einhergehende Kantenlängen (Orientierung an Geometrie des Betrachtungsraumes sowie den Anforderungen nach [12]),
- Festlegung zur Verwendung des integrierten Strahlungsmodells (in Abwägung zu auftretenden erhöhten Oberflächentemperaturen und Wärmeemissionen innerhalb des Betrachtungsraums),
- Festlegung der Berechnungsdauern zwischen Speicherintervallen zur Datensicherung (freie Festlegung durch den Anwender),
- Festlegung einer standardisierten Oberfläche, die Objekten ohne weitere Definition zugeordnet wird,
- Festlegung bzw. Parametrisierung erforderlicher Messpunkte unterschiedlicher Ergebnisgrößen der Untersuchungen,
- Festlegung bzw. Parametrisierung der Visualisierung der Berechnungsergebnisse im Rahmen von Smokeview.

5.3.3 Vorbetrachtungen mit FDS

Neben den Berechnungen zur Stoffausbreitung kann das Modell FDS ebenso Verwendung finden, um unterschiedliche Vorbetrachtungen durchzuführen. Die Notwendigkeit entsteht z.B. bei

⁹⁰ Insbesondere die Definition der Kontrollvolumenanzahl je Raumrichtung und die damit verbundenen Kantenlängen können einen Einfluss auf die Berechnungssystematik und Genauigkeit des Verfahrens ausüben; daher sollten die im Rahmen von [12] angegebenen Hinweise zur Festlegung Beachtung finden.

⁹¹ In der praktischen Verwendung begrenzen sowohl die erforderlichen Rechendauern als auch die benötigte Speicherkapazität die Betrachtungsdauer.

⁹² Die nachstehenden Angaben sind teils bereits erörtert worden. Teils ergeben sich diese jedoch ebenfalls aus den allgemeinen Anforderungen an die Modellparametrisierung nach [12] und sind der Vollständigkeit halber aufgeführt. Aufgrund der nicht unmittelbaren Einflüsse auf die Berechnungsvorgänge und -ergebnisse ist eine weitergehende Erläuterung jedoch an dieser Stelle nicht erforderlich.

⁹³ Eine Möglichkeit dazu stellt die Aufbereitung der Modellparametrisierungen ("Eingabedateien") dar.

der Überprüfung von Anwendungsgrenzen der Emissionsmodelle sowie bei deren Verwendung unter Berücksichtigung der tatsächlich vorliegenden thermodynamischen und strömungsmechanischen (zeitabhängigen) Rahmenbedingungen. Insbesondere sind im Vorfeld der Emissionsberechnung Untersuchungen zum Temperaturverlauf von Flüssigkeiten (Abschätzung des Phasenübergangs durch Verdunstung, vgl. Kap. 5.2.3, oder Verdampfung, vgl. Kap. 5.2.4) oder zur Entwicklung der Geschwindigkeit oberhalb von Flüssigkeitsoberflächen (für Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu, vgl. Kap. 5.2.3.1, bzw. Weidlich und Gmehling, vgl. Kap. 5.2.3.2), bspw. infolge der Verwendung von Arbeitsmitteln und des Personenaufenthalts, notwendig. Darüber hinaus erfordert die Anwendung des theoretischen Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodells (vgl. Kap. 5.2.4) die ortsbezogene Ermittlung der Wärmestromdichte auf die emittierende Oberfläche, die aus den Rahmenbedingungen des Umfelds und der Tätigkeit resultiert.

Die Ermittlung der Rahmenbedingungen beruht auf einer der in Kap. 5.3.2 aufgezeigten Systematik entsprechenden Parametrisierung des Berechnungsverfahrens, die jedoch auf die Angaben zur Stoffemission (Charakterisierung der Stoffeigenschaften sowie der flächenbezogenen Stofffreisetzung) verzichtet. Die tätigkeitsspezifische Definition der geometrischen, lüftungstechnischen und thermodynamischen Rahmenbedingungen von Arbeitsraum sowie Arbeits- und Betriebsmitteln auf Grundlage der erfassten Größen des Arbeitssystems bleibt jedoch erforderlich. Die (Vorab-) Berechnung verzichtet auf die Einbeziehung der Stofffreisetzung, so dass lediglich die verschiedenen Rahmenbedingungen durch das Modell verwendet und deren orts- und zeitbezogene Entwicklungen verfolgt werden. Eine orts- und zeitabhängige Konzentrationsberechnung findet an dieser Stelle nicht statt. Die Analyse zur Ermittlung verschiedener zeitabhängiger Umgebungsverhältnisse aufgrund der erfassten Rahmenbedingungen wertet die für die Emissionsermittlung notwendigen Größen aus. Die Quantifizierung und anschließende Verwendung im Rahmen der Emissionsmodelle erfordert somit modellabhängig die Positionierung von Messstellen für die Größen

- der Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar oberhalb der Position einer Flüssigkeitsoberfläche sowie
- der Oberflächentemperatur der Flüssigkeit und
- der Wärmestromdichte auf die Flüssigkeitsoberfläche.

Die Vorbetrachtungen basieren auf der gleichen Parametrisierung der Rahmenbedingungen und Stoffeigenschaften wie die eigentlichen Ausbreitungsberechnungen, die den zusätzlichen Aufwand begrenzen. Eine Übereinstimmung der Messstellen mit der späteren Auswertung der eigentlichen Ausbreitungsrechnung ist nicht erforderlich, bei gleichbleibender Festlegung und Ergänzung um stoffbezogene Ergebnisse besteht allerdings die Verwendungsmöglichkeit im Rahmen von Plausibilitätsprüfungen. Das Programm Smokeview stellt ebenfalls eine Möglichkeit zur visuellen Identifizierung besonderer Bereiche dar, die ggf. in den Ausbreitungsberechnungen genauerer Untersuchungen bedürfen.

5.3.4 Anmerkungen zur Berücksichtigung anderer Modelle zur Stoffausbreitung

Das Ausbreitungsmodell FDS als Übertragung aus dem Brandschutzingenieurwesen bildet das zentrale Element des Verfahrens, durch dessen Verwendung auf Basis der in [67] dargelegten und der ergänzend durchgeführten und in Kap. 6 erläuterten Validierungsuntersuchungen realitätsgetreue Berechnungen zur Beurteilung von Gefahrstoffexpositionen ermöglicht werden sollen. Der interdisziplinäre Übertrag führt zur ortsbezogenen Untersuchung der Ausbreitungsbedingungen.

Während bei den Modellen zur Emissionsabschätzung die Möglichkeit zur Erweiterung des vorgeschlagenen Konzepts der WEA bzw. des in Kap. 5.2.6 detaillierten Modellpools besteht, ist dies innerhalb des Moduls zur Erfassung der Stoffausbreitung nur bedingt gegeben. Einerseits ist die dargelegte Überprüfung der berücksichtigten Rahmenbedingungen modellspezifisch und die Verknüpfungen der Module sind auf die Erfordernisse und Ein- bzw. Ergebnisparameter des Modells FDS abgestimmt. Andererseits besitzen die Validierungsuntersuchungen lediglich für dieses Modell Gültigkeit. Eine Berücksichtigung eines anderen Ausbreitungsmodells als zentrales Element erfordert dementsprechend ebenfalls eine Überprüfung und Durchführung der Arbeiten zur Validierung. Allerdings kann das vorgeschlagene Verfahren durch weitere Betrachtungen, welche die unmittelbare Berechnung der Stoffausbreitung nicht berühren, ergänzt werden. Z.B. ist die Verwendung anderer Modelle als zusätzliche Kontrollrechnung bzw. zur Gegenüberstellung von Ergebnissen denkbar.

NIST entwickelt und verbessert das Brandschutzingenieurmodell FDS kontinuierlich weiter. Dementsprechend stehen unterschiedliche Modellversionen zur Verfügung, die sich in der teilweisen Änderung der Umsetzung von Berechnungsansätzen in Untermodellen bzw. in Veränderungen der Eingabesystematik (Erweiterung von Befehlsstrukturen) unterscheiden [90]. Die verschiedenen Versionen basieren jedoch weiterhin auf gleichbleibender bzw. verfeinerter Berücksichtigung der Stofftransportvorgänge und deren Berechnung sowie auf den zentralen Navier-Stokes-Gleichungen. Die Befehlsstrukturen für die WEA sind zwischen den Versionsschritten maximal so verändert, dass die Parameter berücksichtigt bleiben und ggf. in anderer Form definiert werden müssen. Vor der Veröffentlichung neuerer Modellversionen führen die Entwickler weiterhin umfangreiche (Verifikations- und Validierungs-) Tests durch, um sicherzustellen, dass sich die Realitätstreue der Ergebnisse durch die Veränderungen nicht verschlechtert [67].

Das vorgeschlagene Verfahren der WEA bildet einen generellen konzeptionellen Ansatz, dessen Gültigkeit und Validierungsuntersuchungen (vgl. Kap. 6) aufrechterhalten bleibt. Während die konzeptionellen Überlegungen auf der Modellversion 5 beruhen, können diese Grundsätze und Verknüpfungen auch auf die aktuellste Version 6⁹⁴ angewendet werden. Die allgemeine Systematik der WEA bleibt ohne Beeinträchtigung.

5.4 Modul 4: Bewertung der Arbeitsbedingungen

Den Abschluss der Gefährdungsbeurteilung bildet die Bewertung der Tätigkeit im Hinblick auf Gefährdungen für die Gesundheit Beschäftigter sowie die angemessene Maßnahmenableitung. Für stoffspezifische, inhalative Gefährdungen wird dazu das staatliche Grenzwertkonzept des AGW oder - bei nicht vorhandenen AGW - eine anderweitige Bewertungssystematik herangezogen (vgl. Kap. 2.1.4). Die grenzwertbasierte Bewertung beruht auf der Zusammenführung von Daten zu Stoffkonzentrationen sowie tatsächlichem Aufenthalt der Beschäftigten als räumlich-zeitliche Koinzidenz. Eine Bewertung ohne Grenzwerte basiert auf dem Vergleich unterschiedlicher Gestaltungsaspekte (z.B. bei verschiedenen Lüftungsbedingungen).

Die WEA ermöglicht die rechnerische Ermittlung möglicher Stoffkonzentrationen in der Luft des Betrachtungsraumes unter Beachtung der konkreten raum- und tätigkeitsbedingten Rahmenbedingungen. Das angepasste Arbeitssystem erfasst bereits die Angaben zu Aufenthaltsdauern und -orten der Beschäftigten innerhalb des Raumes. Die Verknüpfung beider Aspekte führt zum Bewertungsschritt.

Die tätigkeitsbezogene Bewertung erfordert zunächst die Ermittlung des räumlich-zeitlichen Aufeinandertreffens von Konzentrationen und Beschäftigten. Die Ausbreitungsrechnung protokolliert für die unterschiedlichen Messpunkte über die gesamte Betrachtungsdauer hinweg

⁹⁴ Stand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der vorliegenden Arbeit.

die entstehenden Stoffkonzentrationen und stellt diese in tabellarischer Form zur Verfügung. Anhand den aus der Informationsermittlung bekannten Aufenthaltsdauern und -orten der Beschäftigten ist eine entsprechende Datenauswahl möglich, so dass sich personenbezogene und ortsspezifische Überblicke ergeben. Die Zusammenfassungen erbringen einen direkten Vergleich, ob ein ggf. vorhandener Maximalwert überschritten wird. Entsprechend der mathematischen Grundbewertung variabler Luftkonzentrationen bei ständigem oder wechselndem Aufenthalt von Beschäftigten (Fall III gem. [14, 15]) kann aus den zeitbezogenen Ergebnissen ein zeitlich gewichteter Mittelwert gebildet werden (z.B. durch Auswertung der zeitabhängigen Darstellungen mit Hilfe eines PC-Programms zur Tabellenkalkulation mit entsprechenden Zeitbezügen). Die Zusammenführung der Ergebnisse erfolgt einzelfallabhängig durch den Anwender. Der Abgleich kann jedoch immer nur eine Näherung an die tatsächlichen Bedingungen sein, die sich in verschiedenen Arbeitsschichten ggf. verändern. Bei der Ergebnisauswahl zur Bewertung ist daher zu berücksichtigen, dass im Sinne sicherheitsorientierter Überlegungen lediglich eine grobe Pauschalisierung von Tätigkeitsdauer und -ort vorgenommen wird. Ausnahmen bilden z.B. ständige Aufenthalte an Steuerorganen o.ä. Auf zu detaillierte Festlegungen (z.B. sekundengenaue Datenauswahl, insbesondere in Bereichen in Relation niedriger Stoffkonzentrationen) sollte unbedingt verzichtet werden, um die Zulässigkeit einer Tätigkeit nicht durch die Gefährdungsbeurteilung zu sehr zu fixieren. Hierzu würde bspw. die Berücksichtigung maximaler Konzentrationsniveaus an relevanten Messpunkten (Atembereiche von Beschäftigten) eine Möglichkeit darstellen, die über die gesamte Berechnungsdauer hinweg - ohne unmittelbaren Bezug auf den tatsächlichen zeitlichen Zusammenhang des Aufenthalts - ausgewählt werden. Die Kombination dieser maximalen, bereichsbezogenen Stoffkonzentrationen mit den jeweiligen Aufenthaltsdauern entspräche dem Worst-Case-Ansatz zeitabhängiger Betrachtungen.

Im Anschluss an die Erhebung der Maximal- und Mittelwerte stofflicher Belastungen vergleicht die Bewertung diese mit dem stoffspezifischen Grenzwert. Die Grenzwerte sind ebenfalls bereits im Rahmen der Informationsermittlung samt zeitlicher Bezüge erfasst worden. Sofern kein stoffspezifischer AGW vorliegt, stehen Auswahl und konkreter Wert eines alternativen Grenzwertkonzepts ebenfalls bereits zur Verfügung.

Bestehen weder ein AGW noch anderweitige Grenzwertkonzepte, beruht die Bewertung auf der Identifizierung von "kritischen" bzw. "günstigen" Arbeitsbedingungen. Hierbei ist lediglich der unmittelbare Vergleich von Stoffkonzentrationen an verschiedenen Messstellen bzw. zeitabhängiger Expositionen Beschäftigter bei verschiedenen Gestaltungsvarianten möglich. Analog zum Grenzwertvergleich bieten sich dazu Vergleiche von maximalen Konzentrationen und zeit- und ortsabhängig gemittelten Werten an, die sich aus unterschiedlichen Modellparametrisierungen des Moduls zur Ermittlung der Stoffausbreitung ergeben. Durch die Notwendigkeit jeweils eines Durchlaufs der Module zur Informationsermittlung (in Teilen zu variierenden Rahmenbedingungen), der Erfassung der Stoffemission und der Erfassung der Stoffausbreitung für jede Gestaltungsvariante entsteht ein hoher Berechnungsaufwand.

5.5 Verknüpfungspunkte innerhalb der Wuppertaler Expositions-Abschätzung

Die Verbindung der Module zur Erfassung von Stoffemission und -ausbreitung sowie zur Bewertung benötigt eine Abstimmung, um Ergebnisse im unmittelbar darauffolgenden Betrachtungsschritt einzubinden. Die ermittelten und zwischen den Modellen zu kommunizierenden Werte bilden die jeweiligen Verknüpfungspunkte der WEA.

Als zentrales Element stellt das Ausbreitungsmodell FDS aufgrund der notwendigen Parametrisierung die Anforderung an die Eingangsgrößen, dass diese als flächenbezogener Emissions-

Massenstrom sowie der zugehörigen Emissionsfläche vorliegen. Erfolgt eine Annahme der Stoffemission durch Vorgabe strömungsmechanischer Parameter bzw. deren Ermittlung im Rahmen anderweitiger Untersuchungen, führen die jeweiligen Größen (z.B. Volumenstrom oder Strömungsgeschwindigkeit einer Emission unter Berücksichtigung der Stoffdichte) zur unmittelbaren Verwendung. Kommt dagegen ein Berechnungsmodell der Stofffreisetzung zur Anwendung, muss vor der Weiterverwendung eine Einheitenkonvention der Ergebnisse stattfinden. Die Anpassungsfaktoren der verschiedenen Modelle fasst Tab. 5.2 auf Grundlage von Kap. 5.3 zusammen.

Emissionsmodell	Einheit Ergebnis	Anpassungsfaktor
Modell zur Gas-Emission aus Behältern	[kg/s]	Normierung auf Emissionsfläche
Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu	[g/(cm ² s)]	10 (kg · cm ²)/(g · m ²)
Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling	[g/h]	(kg h)/(3.600.000 g s) Normierung auf Emissionsfläche
Theoretisches Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodell	[kg/s]	Normierung auf Emissionsfläche

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Anpassungsfaktoren der Emissionsmodelle

Wenn die Emission über einen längeren Zeitraum erfolgt, können die entsprechenden Massenströme einerseits als zeitbezogene Mittelwerte (z.B. Abschätzung aus der emittierten Gesamtmasse über die Emissionsdauer hinweg) oder als Wert je Zeitpunkt einbezogen werden. Da das Ausbreitungsmodell zur zeitabhängigen Parametrisierung stark schwankender Emissionsbedingungen komplexe bzw. umfangreiche Eingaben benötigt, bietet sich in derartigen Fällen die Verwendung von Mittelwerten an. Dabei sind jedoch ggf. auftretende Spitzenwerte der Emission zu berücksichtigen. Treten dagegen kontinuierlich ab- oder zunehmende Veränderungen über einen längeren Zeitraum auf, empfiehlt sich deren Berücksichtigung. Die Entscheidung über Zweckmäßigkeit und Zulässigkeit der Verwendung von Mittelwerten begründet sich im Einzelfall durch Überlegungen des Anwenders.

Gleichermaßen macht die realitätsnahe Durchführung von Emissionsberechnungen zwischen der Emissions- und Ausbreitungsrechnung ggf. weitere Verknüpfungen notwendig. Die Rückkopplungen finden verfahrensintern nur Berücksichtigung, sofern das entsprechende Emissionsmodell tatsächlich zur Anwendung kommt. Die verschiedenen Verknüpfungspunkte, die aus Vorbetrachtungen unter Zuhilfenahme des Ausbreitungsmodells zurückberechnet werden, sind in der nachstehenden Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Emissionsmodell	Eingangsgröße aus Vorbetrachtung
Modell zur Gas-Emission aus Behältern	nicht erforderlich
Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu	Zeitabhängige Temperaturentwicklung über Oberfläche, Zeitabhängige Strömungsgeschwindigkeit über Oberfläche
Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling	Zeitabhängige Temperaturentwicklung über Oberfläche, Zeitabhängige Strömungsgeschwindigkeit über Oberfläche
Theoretisches Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodell	Wärmestromdichte thermodynamischer Umgebungsbedingungen auf Oberfläche

Tabelle 5.3: Zusammenfassung von Eingangsgrößen der Emissionsmodelle aus Vorbetrachtungen

Die vollständige Beurteilung der Tätigkeit führt im Rahmen der Bewertung die auftretenden Stoffkonzentrationen mit dem zeitlich-räumlichen Aufenthalt der Beschäftigten zusammen. Die zeitlichen Rahmenbedingungen stehen aus der Datenerfassung des Arbeitssystems zur Verfügung, die Ergebniswerte der orts- und zeitbezogenen Stoffkonzentrationen bilden demnach die Verknüpfung zwischen den Modulen zur Erfassung der Stoffausbreitung und der Bewertung der Arbeitsbedingungen. Die Stoffkonzentrationen werden dazu innerhalb des Ausbreitungsmodells an den zuvor parametrisierten Messstellen in der Einheit $[kg/m^3]$ erfasst und in einer Protokoll-datei ausgegeben.

Anpassungsfaktoren zur Bewertung der Arbeitsbedingungen hängen vom verwendeten Grenzwertkonzept ab: Die rechtsverbindlichen AGW liegen in den Einheiten $[mg/m^3]$ bzw. $[ppm \equiv ml/m^3]$ vor. Erster Fall erfordert einen Anpassungsfaktor von $1.000.000 mg/kg$, im zweiten Fall bindet der Anpassungsfaktor die temperaturabhängige Stoffdichte, die aus der in den Berechnungen erfassten Umgebungstemperatur (global) abgeschätzt werden muss, anhand der Systematik aus Gl. 5.7 und 5.8⁹⁵, ein. Für die tabellarisch vorliegenden Ergebnisse kann die Umrechnung bei großen Temperaturschwankungen auch je Zeitschritt durchgeführt werden, i.d.R. kann bei Differenz um wenige °C hierauf verzichtet werden.

$$\rho_{T_{akt}} = \rho_{Bezug} \frac{T_{akt}}{T_{Bezug}} \quad (5.7)$$

$$c [ppm \equiv ml/m^3] = \frac{c [kg/m^3]}{\rho_{T_{akt}} [mg/ml \equiv kg/m^3]} \cdot 1.000.000 mg/kg \quad (5.8)$$

Andere Grenzwertkonzepte erfordern ggf. ergänzende Anpassungsfaktoren, die sich aus den jeweiligen Einheiten ergeben. Zur Bewertung der Arbeitsbedingungen ohne Grenzwertkonzepte anhand unmittelbarer Vergleiche besteht dagegen keine Notwendigkeit zur Einheitenanpassung.

5.6 Plausibilitätsprüfung von (Zwischen-) Ergebnissen

Gemäß den Vorgaben der GefStoffV und dem angeschlossenen Technischen Regelwerk müssen Ergebnisse von Berechnungen zur Gefährdungsbeurteilung einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden (vgl. Kap. 2.1.4). Diese bildet innerhalb der WEA den Arbeitsschritt zur Kontrolle, ob die Ergebnisse nachvollziehbar sind oder ob diese Auffälligkeiten aufweisen, die näherer Betrachtung bedürfen. Aufgrund der Verknüpfung der Module umfasst diese Überprüfung sowohl das Gesamtergebnis der zeit- und ortsabhängigen Stoffkonzentration als auch die (Zwischen-) Ergebnisse der Emissionsberechnungen.

Das Verfahren erfordert Plausibilitätsprüfungen durch den Anwender auf zwei Ebenen. Einerseits sind Prüfungen der quantitativen Ergebnisse nötig, inwiefern diese tatsächlich (d.h. physikalisch) auftreten können bzw. ob sich Unregelmäßigkeiten in den Berechnungsergebnissen vermuten lassen. Andererseits erfolgen insbesondere im Rahmen der Ausbreitungsberechnung Prüfungen, ob die unterschiedlichen Eingangsgrößen, die umfangreich (z.B. zeitbezogen) eingebunden werden können, während der Berechnungen tatsächlich wie vorgesehen durch das Modell Berücksichtigung finden. Beide Ansätze erfordern vom Anwender Kenntnisse der Modellkonzepte sowie der physikalischen Vorgänge, da keine Möglichkeit zur automatisch generierten Überprüfung besteht.

Die quantitative Überprüfung stellt Überlegungen zur grundsätzlichen physikalischen und berechnungsmethodischen Richtigkeit der Ergebnisse an. Dazu werden die Berechnungsergebnisse im Hinblick auf nachfolgende Fragestellungen begutachtet:

⁹⁵ Parameter der Darstellung: $\rho_{T_{akt}}$ = Stoffdichte bei aktueller Umgebungstemperatur in $[kg/m^3]$, ρ_{Bezug} = Stoffdichte bei Bezugstemperatur in $[kg/m^3]$, T_{akt} = aktuelle Umgebungstemperatur in $[K]$, T_{Bezug} = Bezugstemperatur in $[K]$, c = Stoffkonzentration in $[kg/m^3]$ bzw. $[ppm \equiv ml/m^3]$.

- Treten im Überblick der (Zwischen-) Ergebnisse sprunghafte Änderungen der Werte auf, die auf unbekannte Einflüsse oder mathematische Lösungsprobleme hinweisen?
- Treten bei Ergebnissen und zeitabhängigen Eingangsgrößen der Emissionsmodelle physikalisch widersinnige Verläufe auf (z.B. Druckanstieg trotz Gasausstrom aus Behälter, negative Massenströme etc.)?
- Treten im Vergleich zwischen der gesamten emittierten Stoffmasse bis zu einem Betrachtungszeitpunkt und den entsprechenden Stoffkonzentrationen widersprüchliche Werte auf, bei denen die Konzentrationen oberhalb der möglichen Maxima liegen⁹⁶?

Die Untersuchung dieser Fragestellungen ermittelt ggf. vorliegende Unregelmäßigkeiten, welche die Plausibilität der Ergebnisse infrage stellen. In diesem Fall sind erneute Betrachtungen erforderlich, welche die einbezogenen Parameter und Formelsätze nochmals auf Fehler hin analysieren. Die qualitativen Visualisierungen der Ausbreitungsrechnungen erbringen ggf. Hinweise auf Unregelmäßigkeiten und deren Gründe.

Bei der Verwendung des Ausbreitungsmodells FDS, das die weitreichende Berücksichtigung von zeitabhängigen Rahmenbedingungen zulässt, sind weitere Untersuchungen erforderlich, inwieweit die Rechnungen die definierten Bedingungen tatsächlich berücksichtigen. Die Überwachung der Rahmenbedingungen und Eingangsgrößen basiert auf Festlegung entsprechender Messpunkte, welche bei Einstellung auf entsprechende Parameter (bspw. Emissions-Massenstrom, Massen- oder Volumenströme an Öffnungen lüftungstechnischer Einrichtungen, Temperaturverläufe auf Oberflächen etc.) die jeweiligen Bedingungen über den Verlauf der Berechnungen hinweg dokumentieren. Die im Zuge von Vorbetrachtungen (zeitabhängige Verläufe der Umgebungstemperatur, Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb von Flüssigkeitsoberflächen oder Wärmestromdichten auf Oberflächen) ermittelten Parameter bieten sich bei erneuter Erfassung während der Ausbreitungsrechnung ebenfalls zum Vergleich an. Ergeben sich dabei größere Abweichungen, die sich nicht in der ergänzten Strömung der Stofffreisetzung begründen, sind die berücksichtigten Ergebnisse der Emissionsberechnungen zu hinterfragen. Es werden ggf. überprüfende Berechnungen zu Stoffemission und -ausbreitung notwendig (bspw. mit variierten Emissionsbedingungen).

5.7 Zusammenfassung der Wuppertaler Expositions-Abschätzung

Die WEA beinhaltet verschiedene Konzepte und Modelle, die unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen der Tätigkeiten und bei Beachtung der jeweiligen Anwendungsgrenzen zur Anwendung kommen. Die einzelnen Module greifen auf die Daten, die das konkretisierte Arbeitssystem eingangs zusammenfasst, zurück, um die Modelle auszuwählen und entsprechend zu parametrisieren. Die Festlegung verschiedener Schnittstellen und Verknüpfungen begründet ein geschlossenes Verfahren.

Aus der Abfolge der Modellauswahl und Anwendung in Verbindung mit ggf. erforderlichen Vorbetrachtungen ergibt sich ein allgemeiner Verfahrensablauf, den Abb. 5.3 graphisch zusammenfasst. Modellspezifische Vorgehen, insbesondere zur Parametrisierung des Ausbreitungsmodells FDS, untersetzen diesen Ablauf.

⁹⁶ Zur Klärung der Fragestellung kann ein Ausgabewert des Ausbreitungsmodells FDS herangezogen werden, der zeitabhängig die gesamte Stoffmasse innerhalb des Berechnungsraumes dokumentiert [12].

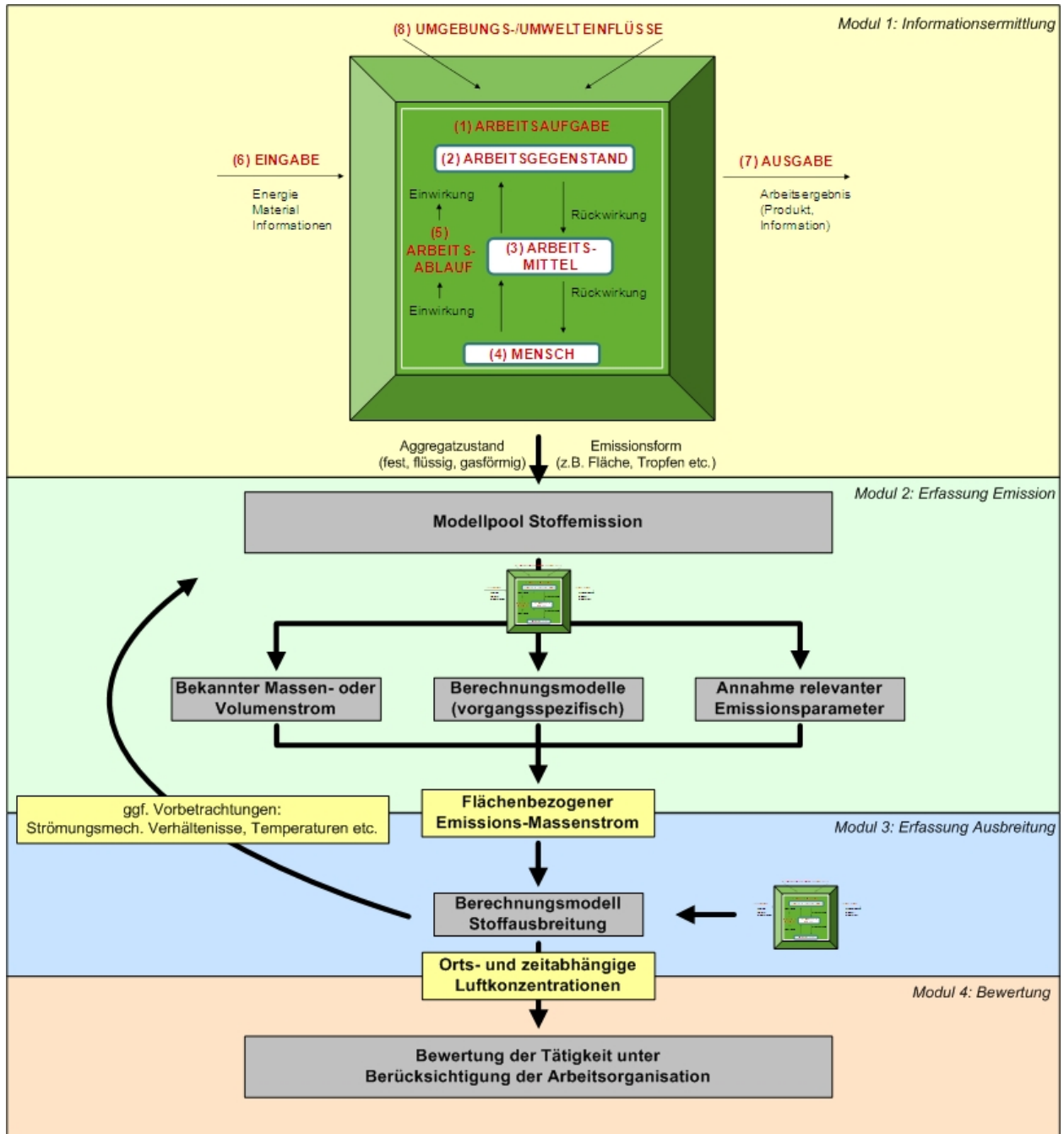


Abbildung 5.3: Entwickeltes Konzept der Wuppertaler Expositions-Abschätzung [7]

Kapitel 6

Validierung der Wuppertaler Expositions-Abschätzung

Als Voraussetzung des praktischen Einsatzes resultiert aus der GefStoffV an das in Kap. 5 konzipierte, rechnerische Verfahren der WEA die Anforderung nachzuweisen, dass der Ansatz dem Stand der Technik entspricht bzw. Berechnungsergebnisse tatsächliche Bedingungen nachempfinden. Dazu werden Untersuchungen zur Ermittlung von Anwendungsbereich bzw. Anwendungsgrenzen sowie zur systematischen Analyse der zu erwartenden Genauigkeit von Berechnungsergebnissen und möglichen Abweichungen notwendig. Die Untersuchungen beinhalten Betrachtungen der Sicherheit und Ergebnistreue der WEA, um in der Praxis Beurteilungsergebnisse einzuordnen und zu bewerten.

6.1 Validierungsmethodik

6.1.1 Allgemeiner Validierungsansatz

Die Verwendung eines Berechnungsverfahrens bei der Gefährdungsbeurteilung zielt auf den Verzicht von stoffbezogenen Messungen (z.B. bei der Planung von Tätigkeiten und Arbeitsbedingungen) ab. Die für die Bewertung der Arbeitsbedingungen erforderlichen Parameter (bei Gefahrstoffen: u.a. Luftkonzentrationen) werden rechnerisch anstatt messtechnisch ermittelt. Berechnungsergebnisse müssen dementsprechend Messwerte in gleicher Weise oder - bei Abweichungen - "auf der sicheren Seite liegend" (d.h. überschätzt) wiedergeben.

Im Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messwerten können Abweichungen sowohl durch konzeptionelle Annahmen und Vereinfachungen in den Modellgleichungen als auch durch abgeschätzte Eingangswerte auftreten. Bei computerbasierten bzw. komplexen Modellansätzen bilden verfahrensinterne Verknüpfungen und Fehler der Programmierung mögliche Ursachen für Differenzen. Beide Faktoren üben erhebliche Einflüsse auf die Realitätstreue und Genauigkeit der Ergebnisse aus.

Generell werden die fehlerbezogenen Untersuchungen eines Berechnungsverfahrens unterteilt in

- die Verifikation und
- die Validierung

eines Modells. Untersuchungen zur Verifikation dienen der "Ermittlung von Rechenfehlern innerhalb von Algorithmen eines Berechnungsmodells"⁹⁷ [8]. Die Verifikation zielt somit auf die Fest-

⁹⁷ Je nach Disziplin und fachlicher Ausrichtung existieren unterschiedliche, in Details voneinander abweichende Definitionen, deren Kernpunkte sich überdecken.

stellung der korrekten modellinternen Umsetzung und Verknüpfung von Berechnungsansätzen ab. Demgegenüber umfasst die Validierung die *”Ermittlung der Abweichung von Berechnungsergebnissen von der Realität⁹⁸ (z.B. anhand von Messdaten)”* [8]. Die Bewertung der praktischen Anwendbarkeit der Modelle stellt auf die Bestimmung der Ergebnisgenauigkeit ab.

Die WEA beruht auf Modellen, die bereits singular bzw. mit anderen Betrachtungsschwerpunkten genutzt werden. Für die berücksichtigten Emissionsmodelle, die unmittelbar nachvollziehbare Berechnungsansätze und systematische Erweiterungen berücksichtigen, ist eine Verifikation der konzeptionellen Erweiterung zu zeitabhängigen Betrachtungen sowie der entsprechenden Umsetzung als Tabellenkalkulation erforderlich. Das Brandschutzingenieurmodell FDS verfügt über weitreichende Verifikationsuntersuchungen ohne verbindliche Eingrenzung auf einen Anwendungsbereich, auf die an dieser Stelle Bezug genommen wird [66]. Eigenständige Verifikationsuntersuchungen innerhalb des Moduls der WEA zur Ermittlung der Stoffausbreitung sind daher nicht notwendig. Der Bewertungsschritt der Arbeitsbedingungen muss dahingehend überprüft werden, ob in der Anwendung die Zusammenführung von Stoffkonzentrationen aus den Berechnungen sowie von Angaben zu Aufenthaltsort und -dauer von Personen und stoffspezifischen Grenzwerten aus der Informationsermittlung praktikabel ist bzw. dem Bewertungsansatz der TRGS 900 entspricht.

Validierungsuntersuchungen für Emissionsmodelle bestehen eingeschränkt bzw. auf die konkreten Anwendungsbereiche bezogen, die sich maßgeblich aus den experimentellen Rahmenbedingungen bei der Modellkonzeption ergeben. Diese Parameter begrenzen zunächst den Anwendungsbereich, darüber hinaus wurde nur eine geringe Anzahl an Vergleichsmessungen vorgenommen und analysiert [9]. Das Ausbreitungsmodell FDS wird für Fragestellungen des Brandschutzes durch die Entwickler fortlaufend validiert (vgl. [67]), außerdem ergänzen Validierungsberichte in Fachveröffentlichungen regelmäßig die Darstellungen (z.B. [91]). Untersuchungen zur Stoffausbreitung ohne Brandereignis wurden jedoch nicht durchgeführt bzw. dokumentiert. Wenn möglich müssen daher für die Emissionsmodelle die Anwendungsbereiche überprüft und potentielle Verwendungsmöglichkeiten erweitert werden. Für die Ausbreitungsberechnungen zielt die Validierung auf den Anwendungsbereich im Sinne der Übertragung auf Betrachtungen des Arbeitsschutzes und damit auf Berechnungen ohne Brandereignis ab. Der Bewertungsansatz gem. TRGS 900 stellt dagegen eine mathematische Verknüpfung dar, die sich nicht auf die Wiedergabe von physikalischen Vorgängen bezieht; eine Validierung ist nicht notwendig.

Neben der Betrachtung der verschiedenen Modelle und Ansätze in den einzelnen Modulen bedürfen die aufgestellten Schnittstellen und Verknüpfungspunkte im Hinblick auf ihre formale Richtigkeit und Funktionalität ebenfalls der Verifikation. Neben der Überprüfung von Umrechnungsfaktoren zur (Einheiten-) Konvention von Ergebnis- bzw. Eingangswerten der unterschiedlichen Modelle zählt dazu auch die Prüfung der definierten Auswahllogik, die Möglichkeit zur Einbindung von Vorbetrachtungen (z.B. zur Ermittlung relevanter Luftgeschwindigkeiten) in den Gesamtablauf sowie die verfahrensinterne Prüfung von Berechnungsergebnissen auf Sinnhaftigkeit.

Die erläuterten Validierungsuntersuchungen der WEA beinhalten ggf. erforderliche Verifikationen als parallele Betrachtungen. Die Ergebnisse dienen der Feststellung möglicher Abweichungen und der methodischen Ermittlung ihrer Ursachen. Ggf. festgestellte Differenzen und deren Beträge führen im Anschluss zu Aussagen zur praktischen Anwendbarkeit der WEA, die einen Gültigkeitsbereich des Verfahrens charakterisieren. Außerhalb dieser Grenzen liegende Anwendungen der WEA machen weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Validierung erforderlich, die jedoch die vorliegende Arbeit nicht verfolgt.

⁹⁸ Entsprechend der fachlichen Ausrichtung ergeben sich - analog zur Verifikation - ebenfalls unterschiedliche Definitionen.

6.1.2 Konzeptionelles Vorgehen und Untersuchungsziele

Die Validierungsuntersuchungen beruhen auf Vergleichen von Messwerten und Berechnungsergebnissen. Dabei dienen die bei den Messungen vorherrschenden Rahmenbedingungen und festgestellten Ergebnisse als Referenzbedingungen bzw. -werte, auf denen die Validierung aufbaut. Die Ermittlung dieser Referenzen erfolgte mit in der Praxis üblichen Messgeräten und -methoden, wobei die Untersuchungen die Identifizierung von Fehlern und Unsicherheiten nicht einbeziehen. Die nicht mögliche Wiederholbarkeit der Versuche bzw. die Verwendung von durch Dritte zur Verfügung gestellten Daten begründen u.a. dieses Vorgehen. Für vollständig idealisierte und kontrollierte Versuchsbedingungen kann allerdings von einer hohen Genauigkeit der Messwerte ausgegangen werden.

Die Analysen und Auswertungen prüfen, ob Berechnungsergebnisse reale (gemessene) Werte wiedergeben bzw. in welcher Höhe ggf. Abweichungen vorliegen und ob diese systematische Begründungen erkennen lassen. Die festgestellten Messbedingungen (für das Ausbreitungsmodell z.B. Geometrie, Lüftungsverhältnisse und Charakterisierung der Stoffemission) bilden daher die Eingangsparameter für angeschlossene Berechnungen, die möglichst genau übernommen werden. Die Verwendung gleicher Rahmenbedingungen ermöglicht die direkte Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse mit gemessenen Werten.

Der Betrachtungspunkt der in Kap. 5 vorgestellten WEA liegt im Rahmen der Module zur Erfassung der Stofffreisetzung und -ausbreitung auf der Ermittlung zeitabhängiger Emissions-Massenströme bzw. Luftkonzentrationen. Durch die Zeitabhängigkeit der Parameter, die z.B. aus wechselnden Lüftungsbedingungen, Bewegungen im Raum oder auch entstehenden Turbulenzen resultiert, sind Mess- und Berechnungsergebnisse keine statischen Werte, sondern Verlaufskurven. Aufgrund dessen führt eine statistische Auswertung über bspw. (arithmetische) Mittelwerte nicht zu relevanten Aussagen. Der direkte Vergleich von Parametern kann darüber hinaus nur erfolgen, wenn sich die Werte in ihrem jeweiligen Verlauf (für Messungen bzw. Berechnungen) gleichmäßig auf einem ähnlichen Niveau befinden und keine großen zeitabhängigen Schwankungen bestehen. Andernfalls erfordern die Vergleiche ggf. vereinfachende Darstellungen, z.B. durch Filterung von Extremwerten.

Bei einer Stofffreisetzung durch Transportvorgänge, die unmittelbar von den Umgebungsbedingungen abhängen (z.B. Emission durch Verdunstung), ist davon auszugehen, dass der resultierende Emissions-Massenstrom auf einem grundlegenden Niveau liegt und keine großen Schwankungen aufweist. Ausnahmen bilden bspw. Ausströmungen aus Behältern (Abnahme des Behälterdrucks) bzw. andere situationsspezifische Abnahmen, die genaue Abgrenzungen unterschiedlicher Zeitbereiche aufweisen. Der Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen erfolgt daher innerhalb der Untersuchungen ebenfalls als direkte Gegenüberstellung.

Unter der Voraussetzung konstanter Rahmenbedingungen ist für zeitabhängige Konzentrationsverläufe bekannt, dass sich diese mit zunehmender Betrachtungsdauer einem Konzentrationsniveau (sog. stationäre Bedingungen) annähern, um das herum ggf. Schwankungen auftreten. Bis zum Erreichen dieses Niveaus durchlaufen Luftkonzentrationen einen sog. instationären Bereich, der den zeitabhängigen Konzentrationsaufbau beinhaltet [9]. Bei nicht konstanten Rahmenbedingungen sind die Konzentrationsverläufe von den spezifischen Verhältnissen abhängig, die die Unterteilung in instationäre und stationäre Bedingungen nicht zulassen. Vergleiche zur Auswertung und Interpretation von Konzentrations- bzw. Ausbreitungsberechnungen auf Grundlage von Messwerten erfolgen daher auf unterschiedlichen Ebenen [92]:

- Qualitativer Vergleich von Visualisierungen zeitabhängiger Mess- und Berechnungsergebnisse:

Die Auswertung der Visualisierungen dient der graphischen, rein qualitativen Gegenüberstellung gemessener und berechneter Konzentrationsverläufe zum Vergleich der instatio-

nären Konzentrationszunahme, der grundsätzlichen Konzentrationsniveaus samt ggf. auftretender Schwankungen (inkl. Amplituden) sowie der Identifizierung von Peak- und Extremwerten. Der Vergleich basiert nicht auf der direkten Gegenüberstellung absoluter Werte, sondern beurteilt Aussehen und Charakteristika der zeitabhängigen Darstellungen. Für den Fall, dass die Visualisierungen aufgrund starker Schwankungen der Mess- oder Berechnungsergebnisse die generellen Charakteristika oder stationären Konzentrationsniveaus nicht erkennen lassen, werden die entsprechenden Daten mit Hilfe des sog. gleitenden Mittelwertes⁹⁹ geglättet, der je Zeitpunkt über eine festzulegende Periode ("Dämpfungsfaktor" n) einen Mittelwert berechnet. Der Einfluss von Extremwerten und Schwankungen auf die Darstellung reduziert sich somit [93]:

$$c_{MW,gl}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} c(t-i) \quad (6.1)$$

- Quantitativer Vergleich zeitabhängiger Mess- und Berechnungsergebnisse:

Der quantitative Vergleich beruht auf der Ermittlung von Kennwerten der statistischen Zeitreihenanalyse, welche auf Genauigkeit und systematische Abweichungen gemessener und berechneter Konzentrationsverläufe hinweisen. Die Kennwerte¹⁰⁰ der relativen Abweichung, des inneren Produkts (Cosinus) und des Projektionskoeffizienten basieren auf der Betrachtung der Zeitreihen als sog. multidimensionale Vektoren, deren Lage und Ausprägung zueinander untersucht wird [94]:

- Relative Abweichung - L_2 -Norm

$$\frac{\|\vec{E} - \vec{m}\|}{\|\vec{E}\|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n E_i^2}} \quad (6.2)$$

Die relative Abweichung stellt die prozentuale Differenz der Berechnungsergebnisse zu den gemessenen Referenzwerten dar. Die ideale Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe beschreibt der Wert "0".

- Abweichung Kurvenverlauf - inneres Produkt (Cosinus)

$$\cos \left(\angle \left(\vec{E}, \vec{m} \right) \right) = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot m_i}{\|\vec{E}\| \cdot \|\vec{m}\|} \quad (6.3)$$

Das innere Produkt beurteilt bei Abweichungen der Zeitreihen zueinander die Systematik der Differenzen, indem eine Aussage zu Verschiebungen um einen konstanten Faktor (idealer Wert "1") bzw. Ungleichmäßigkeiten getroffen wird. Ungleichmäßige Abweichungen beruhen bspw. auf unterschiedlichen, gleichzeitig und aufeinander einwirkenden Einflüssen.

- Beste Übereinstimmung - Projektionskoeffizient

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot m_i}{\|\vec{m}\|} \quad (6.4)$$

Ergänzend zum inneren Produkt ermittelt der Projektionskoeffizient den Faktor der besten Übereinstimmung der Zeitreihen. Aussage des Optimalwerts "1" ist, dass Schwankungen lediglich zufällig auftreten.

⁹⁹ Parameter der Darstellung: $c_{MW,gl}(t)$ = zeitabhängige Luftkonzentration, gleitender Mittelwert, n = Anzahl Einzelwerte, die in Mittelwertberechnung einbezogen werden ("Dämpfungsfaktor"), $c(t-i)$ = zeitabhängiger Einzelwert der Luftkonzentration.

¹⁰⁰ Parameter der Darstellung: Kennbuchstabe E = Messwert, Kennbuchstabe m = Berechnungsergebnis, jeweils zum gleichen Zeitpunkt der ermittelten Konzentrationsverläufe.

Die statistischen Kennwerte unterstützen die im Rahmen der qualitativen Vergleiche festgestellten Beobachtungen, so dass beide Aspekte der Analysen gemeinsam durchgeführt werden. Insbesondere das Stützen von Aussagen auf die ausschließliche Interpretation der statistischen Kennwerte vernachlässigt jedoch z.B. Erkenntnisse zu Über- und Unterschätzungen, zum allgemeinen Schwankungsverhalten oder zu charakteristischen Konzentrationsentwicklungen.

Über die Gegenüberstellung von (Zwischen-) Ergebnissen der einzelnen Module der WEA hinaus unterstützen Analysen von Hilfsgrößen ggf. bei der Auswertung der Validierungsuntersuchungen. Insbesondere bei Feststellung von Abweichungen zwischen Referenzwerten und Berechnungsergebnissen liefern z.B. Betrachtungen zu Temperaturverläufen Erkenntnisse zu möglichen Ursachen oder weisen auf fehlerhafte Berechnungen hin. Im Rahmen der Validierungsuntersuchungen werden für derartige Parameter jedoch keine detaillierten quantitativen Vergleiche über die genannten Kennzahlen angestellt, da der Betrachtungspunkt nicht auf diese Größen ausgerichtet ist. Eine Berücksichtigung beruht ausschließlich auf qualitativen Einschätzungen und Vergleichen.

Ergänzend zur reinen Gegenüberstellung von Mess- und Berechnungsergebnissen beziehen die Validierungsuntersuchungen auch einzelne Sensitivitätsbetrachtungen ein. Diese liefern Erkenntnisse zu Einflüssen und Auswirkungen einzelner Rahmenbedingungen (z.B. Lüftungsbedingungen oder Umgebungstemperatur) durch deren gezielte Änderung im Vergleich zu Berechnungen mit den tatsächlich ermittelten Bedingungen. Untersuchungsgegenstand ist in diesen Fällen neben der Bewertung der Übereinstimmung mit Messergebnissen auch die Begutachtung von Veränderungen gegenüber den ursprünglich durchgeführten Berechnungen.

Zusammengefasst dienen die unterschiedlichen Untersuchungen im Rahmen der Validierung der WEA der Klärung folgender Aspekte, die zu Rückschlüssen auf die praxisbezogene Anwendbarkeit führen:

1. Überprüfung der fachlich-inhaltlichen Abstimmung der einzelnen Module der WEA aufeinander, der Erfassung aller erforderlichen Rahmenbedingungen im Zuge der Informationsermittlung sowie der geeigneten Verknüpfung durch die Gestaltung von Schnittstellen;
2. Kontrolle der konzeptionellen Erweiterungen zur Einbindung der Zeitabhängigkeit für Emissionsmodelle und Überprüfung der generellen Verwendbarkeit;
3. Ermittlung der Übertragbarkeit des Brandschutzingenieurmodells FDS auf Betrachtungen des Arbeitsschutzes;
4. Beurteilung der Genauigkeit berechneter Zwischen- und Endergebnisse und ergänzend der Sensitivität im Hinblick auf in der praktischen Verwendung ggf. unsichere bzw. nur abschätzbare Eingangsparameter sowie
5. Definition von Anwendungsbereichen der WEA als geschlossene Anwendung bzw. einzelner Module.

6.2 Durchgeführte Validierungsuntersuchungen

Entsprechend der unter Kap. 6.1.2 aufgeführten Systematik bezieht die Validierung insgesamt drei Untersuchungsreihen ein, die auf unterschiedlichen Ursprungsdaten bzw. Messungen als Referenzwerte beruhen und unterschiedliche Szenarien darstellen. Die verschiedenen empirischen Versuche umfassen dabei voneinander abweichende Rahmen- und Umgebungsbedingungen, so

dass für jede Untersuchungsreihe eigene Betrachtungsschwerpunkte bestehen. Die Referenzwerte basieren auf

1. Validierungsuntersuchungen des entwickelten Konzepts der WEA im Rahmen des Forschungsprojekts “FP 354 - Validierungsuntersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen”, gefördert durch die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) und durchgeführt durch das Fachgebiet Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit der Bergischen Universität mit Unterstützung durch die Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW), vgl. Kap. 6.2.1 [92, 95];
2. Kalibrierversuche im Expositionslabor des Instituts für Prävention und Arbeitsmedizin (IPA) der DGUV, vgl. Kap. 6.2.2 [96–98] sowie
3. Versuche zur Ausbreitung von Kohlenstoffmonoxid (CO) in Räumen samt Auslöseverhalten von Warnmeldern, die im Rahmen einer universitären Abschlussarbeit im Fachgebiet Sicherheitstechnik / Umweltchemie der Bergischen Universität Wuppertal erfolgten, vgl. Kap. 6.2.3 [99].

6.2.1 DGUV-Forschungsprojekt FP 354

Das Forschungsprojekt “Validierungsuntersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen”, das eine Förderung seitens der DGUV erhielt, umfasste auf das in Kap. 5 vorgeschlagene Konzept der WEA abgestellte Validierungsuntersuchungen in verschiedenen methodischen Schritten. Diese beinhalteten die eigenverantwortliche messtechnische Ermittlung von Luftkonzentrationen unter definierten Rahmenbedingungen und deren Verwendung innerhalb der rechnerischen Betrachtungen.

Den Aufbau der Untersuchungen, das zugrundeliegende Validierungskonzept, die Beschreibung der Messungen und Berechnungen sowie die Erläuterung und Diskussion der Ergebnisse samt Schlussfolgerungen stellen der eigenständige Projektbericht (vgl. [95]) sowie das zugehörige Validierungskonzept (vgl. [92]) umfassend dar. Der Verfasser der vorliegenden Arbeit hat beide Dokumente selbstständig und eigenverantwortlich erstellt. Die vorliegende Arbeit stellt die Inhalte dieser Dokumente nur in fachlich-inhaltlichen Kernpunkten sowie die Ergebnisse samt Diskussion und Interpretation dar. Zur umfassenden Studie wird auf [92, 95]¹⁰¹ verwiesen.

6.2.1.1 Untersuchungsziele und konzeptioneller Aufbau

Der konzeptionelle Aufbau, die Durchführung und die Auswertung der Versuche, Berechnungen und Vergleiche des Forschungsvorhabens dienen der vollumfänglichen Klärung der unter Kap. 6.1.2 angeführten Validierungsziele. Dazu wurden in einem definierten Raum und unter möglichst kontrollierten Rahmenbedingungen praxisbezogene Versuche zur Messung von Luftkonzentrationen durchgeführt, welche die Referenzbedingungen und -ergebnisse für die abgeschlossenen Berechnungen und Ergebnisvergleiche darstellten.

¹⁰¹ Aufgrund der umfassenden Darstellung wird auf die Kennzeichnung von Zitaten - mit Ausnahme der Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ableitung von Anwendungsbedingungen - verzichtet. Es gilt der allgemeine Hinweis, dass die Inhalte dieses Unterabschnitts mit Ausnahme der ergänzenden Sensitivitätsbetrachtungen den Inhalten von [92, 95] entsprechen.

Die Klärung der Untersuchungsziele erfolgte anhand einer konzeptionellen Schrittfolge, in denen unterschiedliche (Teil-) Aspekte im Fokus standen:

– Untersuchungsschritt 1:

Untersuchungen zur Validierung des Ausbreitungsmodells anhand von Mess- und Berechnungsergebnissen bei gezielter Gasfreisetzung von Propan (keine Betrachtung des Moduls zur Abschätzung der Emission) sowie der Schnittstellen zum Modul der Informationsermittlung.

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgten die Betrachtung der ermittelten Bedingungen sowie Sensitivitätsuntersuchungen, insbesondere zur Veränderung und Anpassung von Lüftungsbedingungen.

– Untersuchungsschritt 2:

Untersuchungen zur Validierung des Ausbreitungsmodells sowie des Gesamtablaufs der WEA anhand von Mess- und Berechnungsergebnissen zu kontrollierten Verdunstungen von Isopropanol.

Die Betrachtungen des Untersuchungsschritts 2 untergliederten sich in ein zweistufiges Vorgehen, um unterschiedliche Aspekte zu überprüfen:

- Untersuchung des Ausbreitungsmodells, Verwendung der gemessenen Emissions-Massenströme,
- Untersuchung des Gesamtablaufs der WEA inkl. der Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu sowie Weidlich und Gmehling, der Schnittstellen zwischen den Modulen der Informationsermittlung, der Erfassung der Emission sowie der Erfassung der Stoffausbreitung und der Ergebnisüberprüfung.

In beiden Unterschritten wurden neben der Verwendung der bei den Versuchen ermittelten Bedingungen ebenfalls Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt, die Anpassungen bzw. Veränderungen der berücksichtigten Lüftungsbedingungen umfassten.

6.2.1.2 Rahmenbedingungen und Durchführung von Referenzversuchen

Die Referenzversuche erfolgten in einem Laborraum der BGW¹⁰², der sich im Untergeschoss des Gebäudes Bonner Straße 337 in 50968 Köln befindet. Die nachstehende Auflistung sowie Abb. 6.1 und Abb. 6.2 geben einen Überblick über die grundlegenden Rahmenbedingungen des Versuchsraums, auf denen die Referenzwertermittlung beruhte:

- Umfassungsbauteile mit üblichen Baustoffen (z.B. Beton oder Gipskarton) ausgeführt;
- maschinelle Zu- und Abluftführung über 2 Zuluftöffnungen mit je ca. $0,0768 m^2$ und eine Abluftöffnung mit etwa $0,09 m^2$ (jeweils Abschätzung aufgrund fächerförmiger Anordnung bzw. vorhandener Lüftungsgitter), keine Möglichkeit zur gezielten Regulierung der Lüftungsbedingungen;
- indirekte Abluftführung über Nebenräume des Versuchsraums, die an die raumluftechnische Anlage angeschlossen sind und an den Versuchsbedingungen über ggf. Undichtigkeiten der Zugangstüren beteiligt waren;
- keine Berücksichtigung vorhandener Fenster und der Zugangstür als Ausschluss der natürlichen Belüftung;

¹⁰² Die Durchführung des Forschungsprojekts beruhte auf einer Kooperation, die neben der Bereitstellung der Räumlichkeiten u.a. die messtechnische Ausstattung umfasste.

- Temperaturverhältnisse abhängig von Zu- und Abluft, für die die raumluftechnische Anlage eine Temperierung der einströmenden Außenluft ohne weitere Regulierungsmöglichkeit vornimmt;
- fest installierte Einrichtung (Labortische, Schränke, Laborabzug, Regale etc.) aus beschichtetem Holz, Berücksichtigung zusätzlicher Einrichtungsgegenstände während der Versuchsdurchführung (z.B. mobiler Arbeitstisch, Büromaterial, Bücher, PC-Ausstattung etc.).

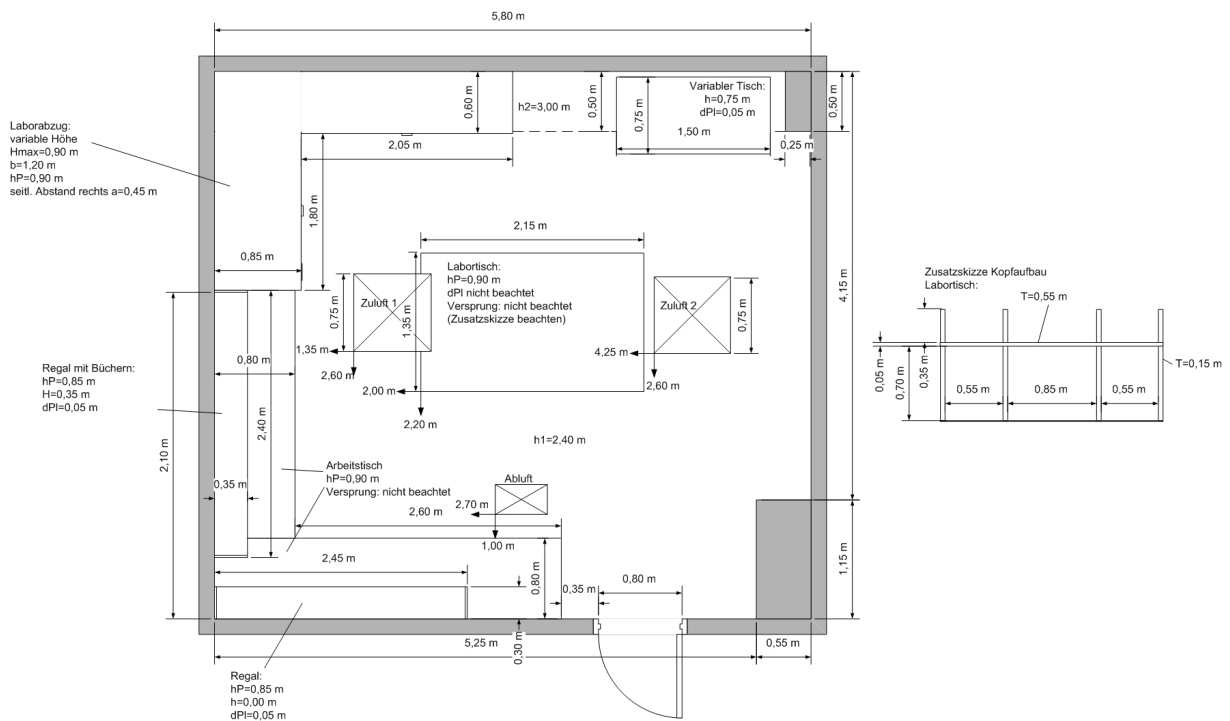


Abbildung 6.1: Planskizze des Versuchsraums im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [7]



Abbildung 6.2: Übersichten des Versuchsraums im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [7]

Im Untersuchungsschritt 1 hielt sich bei allen Versuchen, im Untersuchungsschritt 2 bis auf 2 Ausnahmen ebenfalls immer eine Person im Versuchsraum auf, die vor dem zentral angeordneten Labortisch stand. Bei der gasförmigen Propanfreisetzung aus einer sog. Kleinstflasche (Untersuchungsschritt 1), deren Emissions-Massenstrom aufgrund des vorliegenden Überdrucks

händisch reguliert und über 2 Schlauchverbindungen sowie einen Schwebekörperdurchflussmesser geführt wurde, bestand die Aufgabe der Person in der Steuerung und Überwachung der Emission. Die Flüssigkeit Isopropanol (Untersuchungsschritt 2) verdunstete ohne weitere Regulierung von zwei bzw. einem Tablett mit einer Fläche von je $0,12 \text{ m}^2$.

Aufgrund der messtechnischen Ausstattung und der Aufbauten zur Stofffreisetzung war der Emissions-Massenstrom in beiden Untersuchungsschritten nicht kontinuierlich zu ermitteln. Die Abschätzung des Emissions-Massenstroms erforderte daher die Messung der freigesetzten Gesamtmasse und deren Mittelung über die Betrachtungsdauer hinweg, die für alle Versuche 30 min (entspricht 1.800 s) betrug.

Als Messgeräte zur zeitabhängigen Erfassung (Messwertabstand 1 s) der entstehende Luftkonzentrationen kamen drei sog. Flammenionisationsdetektoren (FID) zum Einsatz, die ein thermisches Messprinzip nutzen und auch in der Praxis für Arbeitsplatzmessungen Verwendung finden. Die Messgeräte wurden entsprechend zu Beginn der Versuchstage sowie in regelmäßigen Abständen kalibriert und aufeinander abgestimmt¹⁰³. Die Aufstellung erfolgte außerhalb des Versuchsraums, so dass die selbstansaugenden Messgeräte mit den Messpunkten durch entsprechende Schläuche verbunden wurden. Neben einem Messpunkt im Atembereich der Person, der in allen Versuchen Berücksichtigung fand, erfolgten Konzentrationsmessungen in verschiedenen Versuchsdurchgängen an den in Tab. 6.1 aufgeführten Messpunkten. Mit Ausnahme für den Messpunkt im Atembereich erfolgte die Festlegung aufgrund von in Voruntersuchungen festgestellten Strömungstendenzen, um verschiedene Raumbereiche einzubeziehen. Im Untersuchungsschritt 1 war ein FID zeitweise nicht einsetzbar, so dass teilweise nur eine Erfassung an zwei anstatt drei Messpunkten gleichzeitig stattfand. Neben den Konzentrationsmessungen wurden verschiedene andere Messgeräte zur Ermittlung der Rahmen- und Umgebungsbedingungen bzw. zur Überwachung der Stofffreisetzung und der Kalibrierung der FID eingesetzt.

Name		Atem	1	2	3	4	5	6	7	8
Propan	$x^{104} [m]$	2,80	4,00	4,15	1,20	5,20	2,40	4,60	5,20	1,55
	$y^{105} [m]$	2,30	1,00	2,35	1,20	3,25	3,30	2,35	2,70	3,05
	$z^{106} [m]$	1,60	0,20	1,90	0,20	0,30	0,95	0,65	0,30	0,30
Isopropanol	$x [m]$	2,80	3,90	4,75	5,20	1,20	2,30	4,00	5,20	4,60
	$y [m]$	2,30	2,20	1,00	2,70	1,20	3,10	1,20	3,35	2,35
	$z [m]$	1,60	1,60	0,65	0,70	0,20	1,00	0,20	0,30	0,65

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Positionierung von Messpunkten im DGUV-Forschungsprojekt FP 354

Die verschiedenen Versuche beruhten auf gezielten (beabsichtigten) und nicht-gezielten (ohne Möglichkeit zur Einflussnahme) Variationen der Bedingungen, aus deren Kombination unterschiedliche Szenarien folgten. Tab. 6.2 fasst die verschiedenen Variationen der einzelnen Untersuchungsschritte zusammen.

¹⁰³ Durch die begrenzten Möglichkeiten bzw. nicht idealisierten Verhältnisse bei der Versuchsdurchführung besteht die Möglichkeit, dass die Referenzwerte durch Messfehler und -unsicherheiten nicht den wahren Werten entsprechen. Die Versuche bilden jedoch die Praxis betrieblicher Messungen ab, die bei der Bewertung von inhalativen Gefährdungen Verwendung finden. Mögliche Abweichungen der Messwerte wurden daher in Kauf genommen.

¹⁰⁴ Abstand „vordere“ Wand, in Abb. 6.1 unten.

¹⁰⁵ Abstand „linke“ Wand, in Abb. 6.1 links.

¹⁰⁶ Höhe über Fussboden.

Gezielte Änderungen	Nicht-gezielte Änderungen
<i>Untersuchungsschritt 1:</i> Emissionsposition; Position Konzentrationsmessung; Einschränkung Zuluftflächen;	Emissions-Massenstrom; Lufttemperatur und -druck, relative Luftfeuchte; Zulufttemperatur; Zu- und Abluftvolumenströme;
<i>Untersuchungsschritt 2:</i> Emissionsposition; Größe Emissionsfläche; Position Konzentrationsmessung; Betrieb Lüftungsanlage; Personenaufenthalt;	Emissions-Massenstrom; Lufttemperatur und -druck, relative Luftfeuchte; Zulufttemperatur; Zu- und Abluftvolumenströme;

Tabelle 6.2: Änderungen der Versuchsbedingungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354

Aufgrund der zeitlich nicht konstanten, nicht-gezielten Änderungen ergaben sich nicht reproduzierbare Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchsdurchgängen, aufgrund derer der Vergleich der gemessenen Luftkonzentrationen an gleichen Messpunkten bei gezielten Variationen nicht möglich ist.

Die grundlegenden Rahmenbedingungen sowie die einzelfallabhängigen Werte sind für beide Untersuchungsschritte und die verschiedenen Versuchsdurchläufe als tabellarische Übersichten in Anhang G zusammengefasst. Abweichungen von den erfassten Bedingungen stellt Tab. G.3 des Anhangs G.1.1.3 dar. Zur Orientierung und eindeutigen Bezeichnung von Versuchen bzw. den zugehörigen Berechnungen verwenden die Darstellungen die in Tab. 6.3 aufgeführte Nomenklatur.

Nummernvergabe: AOBB-C (Beispiel: 2013-3)		
A: Angabe Untersuchungsschritt 1 bzw. 2	BB: fortlaufende Nummer zur Versuchsidentifikation	C: nur für Berechnungen: Nummer des Berechnungslaufs, z.B. zur gezielten Parametervariation

Tabelle 6.3: Nummerierungssystem Versuche und Berechnungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354

6.2.1.3 Durchgeführte Berechnungen und Parametrisierung

Im Anschluss an die Ermittlung der Referenzbedingungen und -werte wurden unter Berücksichtigung dieser Werte Berechnungen angestellt, um die Ergebnisse unmittelbar miteinander zu vergleichen. Untersuchungsschritt 1 bezog dabei ausschließlich das Ausbreitungsmodell ein (Berechnungsszenarien "10BB-1" und "10BB-2"), Untersuchungsschritt 2 umfasste neben reinen Betrachtungen des Ausbreitungsmodelles (Berechnungsszenarien "20BB-1" und "20BB-3") im zweiten Teilschritt dagegen auch Emissionsberechnungen durch die Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling (Berechnungsszenarien "20BB-2" und "20BB-4") sowie Vorbetrachtungen zur Abschätzung der Luftgeschwindigkeiten oberhalb der Verdunstungsflächen.

Die Berechnungen zur Stoffausbreitung beruhen auf 1.920.000 Kontrollvolumen mit einer Kantenlänge von jeweils 0,05 m in allen Raumrichtungen. Die Darstellung der verschiedenen Bau-

teile, Einbauten und Einrichtungsgegenstände sowie des Personenaufenthalts umfasste die Rundung auf diese rechteckgebundene Gitterstruktur. Ebenso wurden die Zu- und Abluftöffnungen angepasst und als Äquivalenzflächen berücksichtigt. Da die Fläche der Emissionsöffnung des Schlauchs in Untersuchungsschritt 1 unterhalb der Kantenlängen lag, bildete der kleinstmögliche Querschnitt von $0,0025 \text{ m}^2$ die zugehörige Äquivalenzfläche, die bei der Umrechnung des flächenspezifischen Emissions-Massenstroms Verwendung fand. Die Verdunstungsflächen des Untersuchungsschritts 2 wurden dagegen auf die Gitterstruktur gerundet, so dass die Flächen nahezu identisch verblieben. Die jeweiligen Emissionsflächen gingen in die Ermittlung der flächenspezifischen Massenströme als zentrale Eingangsgröße der Stofffreisetzung in die Parametrisierung ein. Abb. 6.3 bis Abb. 6.6 zeigen einen Überblick der grundlegenden Parametrisierung des Ausbreitungsmodells anhand einer Visualisierung des Berechnungsraums.

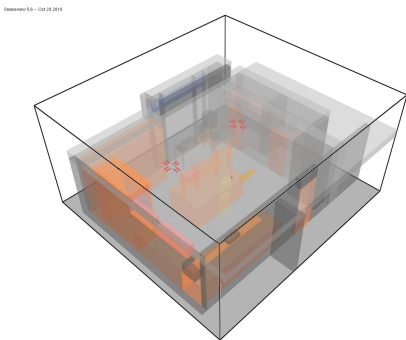


Abbildung 6.3: Überblick Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (halbtransparente Darstellung) [7]

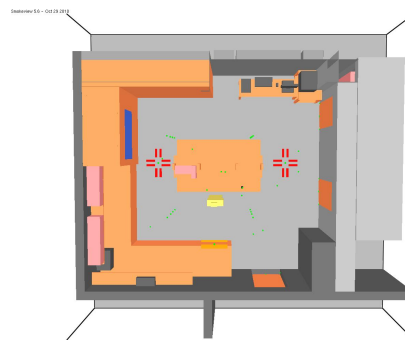


Abbildung 6.4: Aufsicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (intransparente Darstellung) [7]

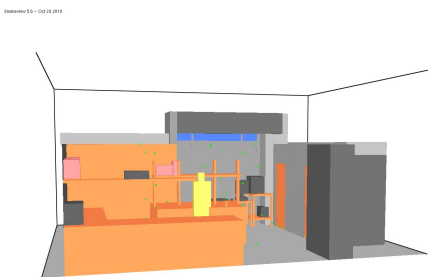


Abbildung 6.5: Vorderansicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (Schnitt vordere Wand) [7]

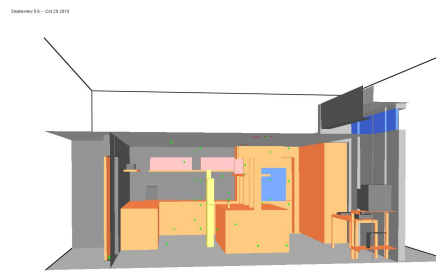


Abbildung 6.6: Seitenansicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (Schnitt rechte Wand) [7]

In beiden Untersuchungsschritten umfassten die Ausbreitungsberechnungen zunächst die aus den zeitlich gemittelten, freigesetzten Stoffmassen abgeleiteten Emissions-Massenströme. Untersuchungsschritt 2 bezog zusätzlich Berechnungen zur Stofffreisetzung (Isopropanol) durch Verdunstung und deren anschließende Verwendung als Eingangsgröße für Ausbreitungsberechnungen ein. Eine wesentliche Eingangsgröße der verwendeten Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu sowie Weidlich und Gmehling bildet die Luftgeschwindigkeit oberhalb der Verdunstungsfläche in deren Längsrichtung, deren Abschätzung ebenfalls das Ausbreitungsmodell

unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen, aber ohne Stofffreisetzung, ermöglichte. Die berechneten Werte dienten den Emissionsberechnungen als Eingangswerte, wobei beide Verdunstungsmodelle vergleichend zur Anwendung kamen. Die anschließenden Berechnungen der Stoffausbreitung übernahmen unter der Beachtung der Anwendungsgrenzen der Verdunstungsmodelle die höheren und damit ungünstigeren, berechneten Emissions-Massenströme.

Sowohl im ersten als auch im zweiten Untersuchungsschritt bezogen sich die Berechnungen zunächst auf die gemessenen Referenzbedingungen. Bei den Messungen zeigte sich, dass die Volumenströme von Zu- und Abluft einerseits während der Erfassung Schwankungen aufwiesen, eine kontinuierliche Überwachung der Lüftungsbedingungen über die Versuchsdauer hinweg war jedoch nicht realisierbar. Daher wurden Mittelwerte in die Ausbreitungsrechnungen übernommen. Andererseits stimmten die Gesamt-Volumenströme der Zu- und Abluft nicht überein, so dass die zugehörigen Berechnungen um einen Ausgleich über die angrenzenden Nebenräume erweitert wurden. In einem weiteren Betrachtungsschritt bzw. zur Untersuchung von Sensitivitäten erfolgte daher die Annahme ausgeglichener Volumenströme von Zu- und Abluft durch Anpassung der Zuluftbedingungen, so dass die Luftführung über die Nebenräume entfiel. Ergänzende Einzelbetrachtungen begrenzten die Lüftungsbedingungen weiter.

Die unterschiedlichen Betrachtungen und berücksichtigten Aspekte führten zu unterschiedlichen Berechnungsszenarien für die einzelnen Versuche. Tab. 6.4 führt die verschiedenen Berechnungsschritte bzw. -szenarien als systematische Betrachtungen auf. Die unterschiedlichen Berechnungsszenarien mitsamt der einbezogenen Rahmenbedingungen, aus denen ggf. erforderliche Anpassungen hervorgehen (z.B. Bildung von äquivalenten Emissionsflächen und -Massenströmen), sind in Anhang G.1.2 dargelegt.

Untersuchungsschritt 1	Untersuchungsschritt 2
<ol style="list-style-type: none"> 1. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmen- und Emissionsbedingungen 2. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmen- und Emissionsbedingungen 2. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) 3. Berechnung Strömungsgeschwindigkeiten über Emissionsflächen durch Ausbreitungsmodell (ohne Stofffreisetzung) 4. Berechnung Stofffreisetzung mit Verdunstungsmodellen entsprechend der ermittelten Rahmenbedingungen unter Verwendung der abgeschätzten Strömungsgeschwindigkeiten 5. Berechnung Stoffausbreitung entsprechend der ermittelten Rahmenbedingungen und unter Verwendung der berechneten Stofffreisetzung 6. Berechnung Stoffausbreitung unter angepassten Lüftungsbedingungen (als Sensitivitätsbetrachtungen) und unter Verwendung der berechneten Stofffreisetzung

Tabelle 6.4: Übersicht methodischer Berechnungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354

Nach Abschluss des DGUV-gefördertern Forschungsprojekts ergänzten weitere Sensitivitätsuntersuchungen die bereits gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse, die sich aus den Feststellungen ergaben. Diese zusätzlichen Berechnungsdurchgänge beruhten auf den im Rahmen des ersten Teilschritts im Untersuchungsschritt 2 aufgestellten Ausbreitungsberechnungen (Verwendung gemessener Emissionsbedingungen als Eingangsparameter) mit dem Ziel, einzelne Tendenzen alleine in der Nutzung des Ausbreitungsmodells weiter zu analysieren. Es fanden lediglich Szenarien mit Betrieb der Lüftungsanlage Verwendung, wobei die nachstehenden Ergänzungen bzw. Variationen erfolgten:

- Variation der Lüftungsbedingungen (Szenariokennzeichnung “SL”) Abstimmung der Zu- und Abluftvolumenströme aufeinander und gemeinsame (willkürliche) Begrenzung dieser Lüftungsbedingungen auf 370, 400 bzw. 420 m^3/h ;
- Variation der Temperaturverhältnisse (Szenariokennzeichnung “ST”) Verwendung der in anderen Berechnungsdurchgängen verwendeten Raumtemperatur zu Betrachtungsbeginn als konstante Zulufttemperatur unter Beibehaltung der angepassten Lüftungsbedingungen aus Szenarien der im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Berechnungen (alleinige Abstimmung der Zuluft-Volumenströme auf Abluftbedingungen, keine gemeinsame Begrenzung).

Die Rahmenparameter der weiterführenden Sensitivitätsuntersuchungen sind ebenfalls im tabellarischen Überblick der Eingangsgrößen in Anhang G.1.2 aufgeführt.

6.2.1.4 Auswertung der Vergleiche

Die an dieser Stelle angeführte Zusammenfassung der Vergleiche zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen pauschalisiert die festgestellten Relationen. Die dargelegte Interpretation führt die im Rahmen des Forschungsprojekts erlangten Erkenntnisse zu Gesamtaussagen zusammen und ist [95] entnommen.

Die Diskussion verzichtet an dieser Stelle auf die Darstellung bzw. Visualisierung aller Vergleiche. Beispielhafte bzw. besonders in der Diskussion beachtete Ergebnisse werden als Visualisierungen der berechneten gegenüber den gemessenen Konzentrationsverläufen samt statistischer Kennwerte, ggf. zur Präzisierung auch anhand gleitender Mittelwerte, in Anhang H.1¹⁰⁷ aufgeführt. Die im Rahmen der ergänzenden Sensitivitätsuntersuchungen erzielten Berechnungsergebnisse und die zugehörigen Vergleiche mit den Messwerten sind vollständig aufgeführt. Die Zusammenstellung der statistischen Kennwerte in Anhang H.1.5 umfasst zum Vergleich alle Berechnungsdurchgänge.

6.2.1.4.1 Beschreibung

Untersuchungsschritt 1:

In Untersuchungsschritt 1 (Freisetzung und Ausbreitung von Propan) weisen die Vergleiche sowohl bei Berechnungen mit gemessenen Lüftungsbedingungen (samt Ergänzung über die Abluft der Nebenräume) als auch bei angepassten Lüftungsbedingungen erhebliche Unterschiede zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen auf. Die Ausbreitungsberechnungen unterschätzten die tatsächlich gemessenen Stoffkonzentrationen erheblich, wie die Versuche “1019-1” und “1021-2” (aufgeführt in Anhang H.1.1) beispielhaft aufzeigen.

Die Anpassung der Lüftungsbedingungen führt i.A. zu einer Annäherung zwischen gemessenen und berechneten Konzentrationsverläufen, die in Anbetracht der absoluten Differenzen jedoch

¹⁰⁷ Die Ergebnisse sind nach den verwendeten FID (“Atem”, “A” und “B”) untergliedert. Die Realpositionen von FID “A” und “B” gehen neben der tabellarischen Auflistung aus den unmittelbar in den Visualisierungen angegebenen Koordinaten hervor.

marginal sind. Insbesondere bei Messpunkten in Bodenhöhe sowie in näherer Umgebung zum Emissionspunkt sind erhöhte Konzentrationsverläufe deutlicher als an anderen Messpunkten festzustellen. Bei direkter Nähe des Messpunkts zur Stoffemission (Konzentrationserfassung auf Labortisch neben Emissionspunkt) erfolgt entgegen allgemeiner Tendenzen in Szenarien sowohl ohne als auch mit Anpassung der Lüftungsbedingungen eine erhebliche Unterschätzung der Messergebnisse, die in dieser Form ausschließlich an diesem Messpunkt auftreten. Ergebnisse von im Zuge der Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführten Berechnungen, die auf einer willkürlichen allgemeinen Absenkung des Luftaustauschs des Versuchsraums beruhen, bestätigen die Feststellungen.

Die Untersuchung der berechneten Lufttemperaturen ergibt, dass diese mit einer Ausnahme (einziges Szenario mit einer Ausgangstemperatur unter 20°C) über die Betrachtungsdauer hinweg abnehmen und damit den in den Versuchen gemessenen Temperaturzunahmen widersprechen. Durch Anpassung der Lüftungsbedingungen verringert sich bei Betrachtungsfällen ohne Zuluftbeschränkung der Betrag dieser Abnahmen, die Tendenz der Verläufe bleibt jedoch bestehen. Für die beschränkte Zuluftführung (Versuchsbedingung) erhöht sich dagegen die Unterschiedlichkeit der Temperaturverläufe weiter.

Untersuchungsschritt 2

In Untersuchungsschritt 2 (Freisetzung und Ausbreitung von Isopropanol) untergliedern sich die Vergleiche allgemein in die angestellten Unterbetrachtungen (Ausbreitungsberechnungen mit gemessenen bzw. rechnerisch erfassten Emissionsbedingungen) sowie innerhalb derer in Fallbetrachtungen ohne und mit Anpassung der Lüftungsbedingungen. Die Vergleichsführung erfordert die entsprechende Unterscheidung dieser Berechnungsszenarien, da diese auf veränderten Eingangsparametern beruhen.

Der erste Teilschritt basiert auf gemessenen, zeitlich-gemittelten Emissions-Massenströmen. Unter dieser Voraussetzung befinden sich die Berechnungsergebnisse in den Berechnungsszenarien ohne Anpassung der Lüftungsbedingungen allesamt im Bereich der Messwerte, wobei in Abhängigkeit zu Messpunkten und räumlichen Relationen zur Emissionsquelle sowohl geringfügige Unter- als auch Überschätzungen auftreten (vgl. Anhang H.1.2). Der Messpunkt im Atembereich der Person tendiert dabei zur Unterschätzung gemessener Luftkonzentrationen (z.B. in den Versuchen "2006-1", "2009-1", "2010-1" und "2017-1"). Ausnahme stellt der Messpunkt auf dem Labortisch im Falle einer unmittelbar benachbarten Stofffreisetzung dar, wobei analog zu den Vergleichen im Untersuchungsschritt 1 die Berechnungen die Messergebnisse erheblich unterschätzen. Allgemein zeigen sich neben den guten Übereinstimmungen der grundlegenden Konzentrationsniveaus, die deutlich bei Betrachtung der Darstellungen mit gleitenden Mittelwerten (bspw. in Versuch "2008-1") heraustreten, große Schwankungen in den berechneten Konzentrationsverläufen. Diese beeinflussen die statistischen Kennzahlen dahingehend, dass diese die tatsächlichen Tendenzen nicht wiedergeben und als Bewertungsfaktor nicht allein stehend betrachtet werden dürfen. Die Begutachtung der Temperaturvergleiche ergibt, dass sich i.A. sowohl gemessene als auch berechnete Verläufe auf gleichbleibendem bzw. abnehmendem Niveau bewegen. Dabei weisen die berechneten Lufttemperaturen jedoch höhere Beträge der Temperaturabnahme auf als in den Messungen festgestellt wurden. Über die Entwicklungen hinaus identifizierte die Untersuchung der Temperaturverläufe in einem Berechnungsszenario eine Falschparametrisierung des Ausbreitungsmodells.

Die Anpassung der Lüftungsbedingungen ergibt für die Berechnungsszenarien unter Verwendung der gemessenen Emissionsbedingungen eine allgemeine Angleichung der Berechnungs- an die Messergebnisse und somit eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung. Die Annäherungen erfolgen sowohl bei zuvor festgestellten Über- als auch Unterschätzungen (z.B. Versuche "2006-2", "2009-2" und "2017-2"). Für den Messpunkt im Atembereich werden gegenüber nicht-angepassten Lüftungsverhältnissen nunmehr geringe Überschätzungen der gemessenen Konzen-

trationsverläufe ermittelt. Sowohl die aufgetretenen Schwankungen der Berechnungsergebnisse als auch das besondere Verhalten des Messpunkts auf dem Labortisch bei benachbarter Emission bleiben bestehen. Die entsprechenden statistischen Kennwerte bilden die positiven Entwicklungen des Messpunkts im Atembereich aufgrund der vorliegenden Schwankungen weiterhin nicht ab, für die anderen Messpunkte tritt tendenziell eine "Verbesserung" dieser Bewertungsgrößen als Anhaltswerte der Entwicklungen ein.

Die Vergleiche der Temperaturverläufe zueinander sowie zu Berechnungsszenarien ohne Anpassung von Lüftungsbedingungen zeigen ebenfalls die Beibehaltung der festgestellten Tendenzen. Die absoluten Differenzen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen verringern sich allerdings.

Die zweite Teilbetrachtung des Untersuchungsschritts 2 bezieht die zuvor durch Verdunstungsmodelle berechneten Emissions-Massenströme ein. Diese Abschätzungen erfordern eine Vorbetrachtung mit Hilfe des Ausbreitungsmodells (Geschwindigkeitsbestimmung ohne Stoffemission und Konzentrationsberechnung). Die mit der vorgesehenen Systematik ermittelten Luftgeschwindigkeiten oberhalb der Emissionsfläche führten zu der Feststellung, dass mit wenigen Ausnahmen der Anwendungsbereich des Verdunstungsmodells nach Weidlich und Gmehling (Luftgeschwindigkeit größer als $0,20 \text{ m/s}$ bis max. $0,70 \text{ m/s}$) nicht eingehalten ist. Im Übrigen errechnete das Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu in allen Szenarien die höheren Emissions-Massenströme, die in die Ausbreitungsberechnungen Eingang fanden.

Der Vergleich der zeitlich-gemittelten Emissions-Massenströme zeigt, dass die Berechnungsergebnisse sowohl ohne als auch mit Anpassung der Lüftungsbedingungen mit Abweichungsfaktoren zwischen ca. 2,4 und 5,5, bei abgeschalteter Raumlüftung zwischen etwa 4,5 und 10, deutlich unter den gemessenen Emissionswerten liegen (vgl. Anhang H.1.2, Tab. H.7¹⁰⁸ bzw. Tab. H.2¹⁰⁹). Weiterhin sind teilweise Abweichungen der Abstufung der emittierten Stoffmassen bei zwei Verdunstungsflächen zueinander festzustellen.

Aufgrund der deutlich unterschätzten Emissionsbedingungen werden auch in den angeschlossenen Ausbreitungsrechnungen die gemessenen Luftkonzentrationen i.A. nicht erreicht (z.B. Versuche "2006-3", "2010-2", "2009-4" und "2017-4"). Allerdings lassen sich vereinzelt messpunkt- und szenarioabhängig Besonderheiten - bis hin zur Überschätzung der Messwerte (siehe Versuch "2009-3") - feststellen. Allgemeine Tendenzen sind sowohl ohne als auch mit Anpassung der Raumlüftung nicht zu erkennen, allerdings weisen die Berechnungsergebnisse z.T. erhebliche zeitabhängige Schwankungen auf. In keinem der aufgestellten Vergleiche erreichen die Berechnungsergebnisse eine einheitliche Annäherung an die Messergebnisse. Besonderheiten belaufen sich immer auf einzelne Messpunkte in Einzelfällen.

Ergänzende Sensitivitätsuntersuchungen

Die ergänzenden Vergleiche zur Sensitivität des Berechnungsmodells auf die weitergehende Abstimmung der Zu- und Abluftbedingungen und die Variation der Raum- und Zulufttemperatur erfordern ebenfalls eine szenario- und ortsbezogene Betrachtung.

Hinsichtlich der Lüftungsbedingungen weisen die berechneten Konzentrationen im Vergleich zu den innerhalb des Untersuchungsschritts 2 verwendeten Parametrisierungen i.A. höhere Werte bzw. Verläufe auf. Gleichzeitig liegen weniger bzw. geringere Schwankungen der Konzentrationen vor. Mit Zunahme der berücksichtigten Zu- und Abluftströme nehmen die Konzentrationsniveaus ab (erkennbar am einheitlichen Messpunkt im Atembereich und im Messwertvergleich). Am Messpunkt innerhalb des Atembereichs folgt daraus eine Angleichung an die Messergebnisse, welche die Übereinstimmung verbessert. Diese nimmt ebenfalls mit Erhöhung des Luftaustauschs zu. An den anderen Messpunkten, die sich allesamt in Bodennähe und unterhalb

¹⁰⁸ Darstellung als gesamte während der Versuchsdauern emittierte Isopropanolmassen.

¹⁰⁹ Darstellung in Form zeitlich-gemittelter, flächenspezifischer Verdunstungs-Massenströme.

des Tischniveaus bzw. auf dem Labortisch befinden, bewirkt die Konzentrationszunahme entweder eine Angleichung an den Messwert oder eine Steigerung bereits ermittelter Überschätzungen. Ausnahme bildet die Beibehaltung der erheblichen Unterschätzung für den Messpunkt auf dem Tisch bei benachbarter Stoffemission. In den Berechnungen mit Lüftungsvolumenströmen von $370 \text{ m}^3/\text{h}$ treten weiterhin teilweise messtechnisch nicht nachgewiesene Konzentrationserhöhungen zum Ende der Versuchsdauer auf. Im Übrigen bleiben die qualitativen Konzentrationsverläufe ähnlich den ursprünglichen Berechnungen bestehen. Die statistischen Kennzahlen drücken diese Entwicklungen nur bedingt aus bzw. deuten das Verhalten an, da noch vorhandene Schwankungen das jeweilige Gesamtergebnis beeinflussen. Bei starken Schwankungen verdeutlichen die Auswertungen mit gleitenden Mittelwerten die festgestellten Tendenzen.

Die Temperatúrauswertungen zeigen weiterhin abnehmende Verläufe auf, welche für Raum- und Zulufttemperatur qualitativ ähnlich sind und die gemessenen Werte unterschätzen. Im Vergleich mit den ursprünglichen Berechnungen nehmen die Temperaturunterschiede ab, gleichzeitig mit steigenden Volumenströmen marginal zu.

Bei Annahme gleicher Raum- und Zulufttemperaturen weisen die Konzentrationsverläufe i.A. ebenfalls geringere Schwankungen auf. Hinsichtlich der Entwicklung der berechneten Stoffkonzentrationen ergeben sich dagegen differenziertere Bedingungen: Im Atembereich gleichen sich die berechneten Konzentrationsverläufe tendenziell an die Messwerte an. Dies geschieht sowohl durch Erhöhungen als auch durch Verminderungen der Berechnungsergebnisse im Vergleich mit der zugrunde liegenden Parametrisierung mit abgestimmten Lüftungsbedingungen des Untersuchungsschritts 2. Ausnahme bildet das Ergebnis des Szenarios "2012-6", in dem die Unterschätzung zunimmt. Diese Entwicklungen lassen auch zumeist die statistischen Kennwerte erkennen. An den Messpunkten außerhalb des Atembereichs nehmen, mit wenigen Ausnahmen, die Berechnungsergebnisse im Vergleich der Szenarien untereinander in geringem Umfang zu oder verbleiben auf gleichem Niveau. Dabei ist die Anordnung der Messpunkte charakteristisch, in dem die gleichen bzw. abnehmenden Konzentrationen in Bodennähe mit deutlichem Abstand zur Verdunstungsfläche und zur anwesenden Person auftreten. Teilweise weisen diese Messpunkte entgegen der allgemeinen Tendenzen erhöhte Konzentrationsschwankungen auf. Im Messwertvergleich führt dies zu einer geringfügigen weiteren Angleichung bzw. Überschätzung. Diese einzelfallbezogenen Entwicklungen zeigen sich ebenfalls in den statistischen Kennwerten. Ausnahmen bilden einerseits die Berechnungsszenarien "2012-6" (Ab- bzw. Zunahme als Verschlechterung der Ergebnisse, gleichzeitig Zunahme von Konzentrationsschwankungen) und "2013-6" (Beibehaltung der erheblichen Unterschätzung am Messpunkt auf dem Tisch bei benachbarter Freisetzung). Andererseits gleichen sich die Berechnungsergebnisse in den Szenarien ohne Personenaufenthalt an die Messwerte sowohl durch Ab- als auch Zunahmen an.

Die Temperatúrauswertung zeigt, dass der Abgleich von Zuluft- und Raumtemperatur eine geringfügige Temperaturzunahme über die Versuchsdauer hinweg bewirkt. Die Temperaturen in der Nähe der Zuluftöffnung liegen geringfügig über den Raumtemperaturen und treten mit deutlich ausgeprägten Schwankungen auf. Ausnahme bilden die Betrachtungsfälle ohne Berücksichtigung einer Person, in denen die Raumtemperaturen geringfügig über den in der Nähe der Zuluft festgestellten Temperaturen liegen und geringere Schwankungen auftreten. Die ursprünglichen Berechnungswerte werden dabei umgekehrt. Gleichfalls ergibt sich gegenüber den Messwerten eine Überschätzung der leicht abnehmenden Temperaturen. Die Überschätzung ist insbesondere bei der Zulufttemperatur erheblich, die deutlich unterhalb der in den Sensitivitätsberechnungen berücksichtigten Niveaus liegt.

6.2.1.4.2 Diskussion und Interpretation

Untersuchungsschritt 1

Im ersten Untersuchungsschritt zeigen die Vergleiche für Berechnungsszenarien ohne Anpassung der Lüftungsbedingungen aufgrund der quantitativen Unterschiede der Konzentrationsverläufe, der Schwankungen der Messergebnisse, die in den Berechnungsergebnissen nicht in dieser Ausprägung auftreten, sowie der Temperaturentwicklungen, dass die Parametrisierung der Lüftungsbedingungen die tatsächlichen Verhältnisse überschätzt. Der erhöhte Luftaustausch führt in Relation zu angepassten Lüftungsverhältnissen zu geringeren Luftkonzentrationen. Die Schwankungen werden als Zeichen für ungleichmäßige, nicht der zeitlichen Mittelung der Berechnungen entsprechende Volumenströme gewertet. Trotz des Schwachpunkts, dass in diesen Versuchen keine Messung der Zulufttemperaturen stattfand, bestärken die widersprüchlichen Temperaturverläufe diese Auffassung. Die manuell kontrollierte, ggf. ungleichmäßige Propan-Freisetzung aus der Kleinstflasche stellt ebenfalls einen mutmaßlichen Einfluss dar (insbesondere auf schwankende Luftkonzentrationen).

Die Anpassung der Lüftungsbedingungen führt trotz verbleibender Unterschiede zur Annäherung der Berechnungsergebnisse an die Messwerte. Diese Kausalität identifiziert die Lüftungsbedingungen als wesentlichen Einflussfaktor auf die Stoffausbreitung bzw. auf die realitätstreue Konzentrationsberechnung mit dem Ausbreitungsmodell. Eine erhebliche Überschätzung von Lüftungsbedingungen führt darüber hinaus zur Überdeckung anderer Effekte. Die Temperaturvergleiche bekräftigen z.B. durch die unterschiedlichen Entwicklungen der Ergebnisse bei Lüftungsbeschränkung diese Feststellung. Für das besondere Verhalten des Messpunkts auf dem Tisch wird ein Zusammenhang zur (vergrößerten) äquivalenten Emissionsfläche unterstellt, dessen Klärung Untersuchungsschritt 1 jedoch nicht ermöglicht.

Zusammenfassend erbringen die Ergebnisse des Untersuchungsschritts 1 keinen Nachweis der Validität des Ausbreitungsmodells, obgleich die Eingangsparameter der Berechnungen durch das Arbeitssystem (Verknüpfung der Module "Informationsermittlung" und "Erfassung Stoffausbreitung") in geeigneter Weise zur Verfügung stehen. Als Ursachen der Abweichungen sind ggf. falsche Abschätzungen der Lüftungsbedingungen und der zeitlich-schwankenden Emissions-Massenströme zu vermuten. Aufgrund der zur Verfügung stehenden (Mess-) Mittel können weiterhin unvollständige Datenerfassungen (z.B. keine Ermittlung der Zulufttemperatur) nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die als Referenzen genutzten Messwerte Fehler und Unsicherheiten aufweisen (z.B. in Verbindung mit dem zeitweisen Ausfall eines FID), die ggf. auch aus der Orientierung der Ansaugschläuche der FID resultieren. Da keine Möglichkeit zur Versuchswiederholung bestand, steht eine abschließende Klärung aus. Bei den weiteren Versuchen des Untersuchungsschritts 2 wurde versucht, die erkannten Fehlerquellen zu minimieren. Aus den Erkenntnissen und Fehlermöglichkeiten folgern sich die nachstehenden Anforderungen an die Informationsermittlung und Durchführung von Ausbreitungsrechnungen:

- genaue Abschätzung von Lüftungsbedingungen mit Abstimmung der Zu- und Abluftvolumenströme sowie von Temperaturverhältnissen,
- Beachtung zeitabhängiger Schwankungen von Eingangsparametern und
- Wiedergabe von Emissionsflächen möglichst ohne bzw. mit lediglich geringen Äquivalenzverhältnissen.

Untersuchungsschritt 2

Die Vergleiche des ersten Teilschritts in Untersuchungsschritt 2 weisen gute Übereinstimmungen der zeitabhängigen Stoffkonzentrationen auf. Steigerungen der Realitätstreue resultieren bei Anpassung der Zu- und Abluftbedingungen. Allerdings treten teils erhebliche Konzentrationsschwankungen in den Berechnungsergebnissen auf.

Die Angleichung an allen Messpunkten (Ausgleich sowohl von Über- als auch von Unterschätzungen) durch Abstimmung der Zuluft auf die Abluft wird auf die Verringerung von Verwirbelungen und Turbulenzen bzw. abnehmende Luftgeschwindigkeiten zurückgeführt. Die Schwankungen in den Berechnungsergebnissen weisen auf Wechselwirkungen von Zuluft und Abluft hin, die aus der räumlichen Anordnung der Lüftungsöffnungen und der Lage der auftretenden Luftströmungen entstehen. Eine Abhängigkeit zum Personenaufenthalt besteht nicht.

Für den Messpunkt auf dem Labortisch führt die Auswertung von qualitativen, dreidimensionalen Visualisierungen der Strömungsbedingungen bei einer Stoffemission im unmittelbaren Nahbereich zu der Feststellung, dass die räumliche Relation zwischen anwesender Person (als Wärmequelle) und Konzentrationserfassung die verbleibende Unterschätzung hervorruft: In den Berechnungen erfasst eine in ihrem Wirkungsbereich überschätzte Auftriebsströmung den freigesetzten Massenstrom. Hinsichtlich einer praktischen Anwendung des Ausbreitungsmodells liegt der wesentliche Messpunkt des Atembereichs in dieser Strömung, so dass hier keine negative Ergebnisbeeinflussung festgestellt wird.

In allen Berechnungsfällen erfolgte die Abschätzung und Parametrisierung der gegenüber der Propan-Freisetzung gleichmäßigeren Isopropanol-Emission infolge der Flüssigkeitsverdunstung augenscheinlich präziser. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Untersuchungsschritts 1 werden die Überdeckungen auch auf den Verzicht weitergehender Anpassungen der Emissionsflächen (keine Verwendung von äquivalenten Flächenanpassungen) zurückgeführt.

Die Vergleiche der Temperaturverläufe, in denen die Berechnungsergebnisse sowohl bei abgeschalteter Raumlüftung als auch bei Anpassung (Verringerung) der Lüftungsbedingungen zur Annäherung an die Messwerte tendieren, sind als verbesserte, aber nicht genaue Parameterabschätzung von Zu- und Abluft zu bewerten. Dies unterstreicht die Raumlüftung als maßgeblichen Einflussfaktor sowie die Wichtigkeit einer genauen Bestimmung der Verhältnisse im Zuge der Informationsermittlung. Als wichtiger Randaspekt ergibt sich darüberhinaus die Feststellung, dass die Analyse der Temperaturverläufe die Identifizierung falscher Parametrisierungen und physikalisch unstimmgiger Berechnungsergebnisse ermöglicht, sofern der Anwender im praktischen Einsatz deren Untersuchung und Verifizierung auch vornimmt.

Unsicherheitsfaktoren für die Berechnungen bzw. deren Ergebnisse bleiben sowohl die Nichtberücksichtigung von zeitabhängigen Schwankungen der Rahmenbedingungen, deren Erfassung in den zugehörigen Versuchen nicht realisierbar war, als auch - bei Anpassung der Lüftungsbedingungen - die alleinige Angleichung der Zuluft. Ggf. lassen sich durch die Abstimmung und gleichzeitige Änderung von Zuluft und Abluft weitere Annäherungen an gemessene Bedingungen erreichen. Zusammenfassend weisen die Ergebnisse dieses Teilschritts die Validität bzw. die praxisorientierte Anwendbarkeit des Ausbreitungsmodells unter verschiedenen Bedingungen nach.

Ungeachtet der Ergebnisvergleiche der Emissions- und Ausbreitungsberechnungen belegt der zweite Teilschritt des Untersuchungsschritts 2 die formal-inhaltlich korrekte Gestaltung nachfolgender Schnittstellen und Verknüpfungen von Modulen und Modellen:

- Bereitstellung erforderlicher Eingangsparameter für Module zur Erfassung der Stofffreisetzung und Stoffausbreitung durch das angepasste Arbeitssystem,
- Verwendung von im Zuge von Vorbetrachtungen (Nutzung des Ausbreitungsmodells FDS ohne Stofffreisetzung) berechneten Luftgeschwindigkeiten in Verdunstungsmodellen nach Weidlich und Gmehling bzw. Mackay und Matsugu,
- Übernahme von Berechnungsergebnissen der Verdunstungsmodelle nach Weidlich und Gmehling bzw. Mackay und Matsugu als Eingangsparameter der Ausbreitungsberechnungen sowie geeignete Umsetzung der Modellansätze in zeitabhängigen Tabellenkalkulationen,

- Bereitstellung von berechneten, zeitabhängigen Luftkonzentrationen für das Modul zur Bewertung der Arbeitssituation (Bewertung nicht ausgeführt),
- Bereitstellung und Verwendung von Ergebnissen der Ausbreitungsrechnungen als Grundlage zur Überprüfung der (z.B. physikalischen) Sinnhaftigkeit als verfahrensinterne Validierung.

Da Parameter bzw. Ergebnisse ggf. in verschiedenen Einheiten erfasst bzw. abgeschätzt und als Eingangswerte zur Modellanwendung vorgegeben sind, verdeutlichen die formalen Nachweise die Notwendigkeit zur Beachtung von Umrechnungsfaktoren. Als Konsequenz resultiert die Anforderung an den Anwender der WEA, besondere Sorgfalt bei der Übertragung und Verwendung der Parameter aufzubringen. Bei identifizierten Fehlern stellen die Schnittstellen den ersten Ansatzpunkt für die erforderlichen Überprüfungen dar. Die Diskussion der (formalen) Ergebnisverläufe der Verdunstungsmodelle verdeutlicht, dass ggf. nur geringe zeitabhängige Streuungen auftreten. Vor dem Hintergrund des Aufwands zur Parametrisierung des Ausbreitungsmodells muss in der praktischen Anwendung im Einzelfall entschieden werden, ob die Mittelwertbildung ausreicht oder ob bei größeren Schwankungen die zeitabhängige Wiedergabe erfolgt.

Bei Abschätzung der Emissions-Massenströme mit den Verdunstungsmodellen unterschreiten diese die gemessenen Werte deutlich. Die wesentlichen (zeitabhängigen) Einflussfaktoren auf die Berechnungen bilden die Verdunstungstemperatur (aus der Umgebungstemperatur) sowie die Luftgeschwindigkeit in Längsrichtung der Emissionsfläche. Für beide Größen kann aufgrund von orientierenden Messwerten unterstellt werden, dass die Vorbetrachtungen diese zumindest größenordnungsmäßig korrekt abschätzen. Hinsichtlich der Parametrisierung der Vorbetrachtungen bleibt weiterhin festzuhalten, dass die Positionierung von Temperatur-Messpunkten ortsgenau erfolgen sollte. Allerdings sind die Temperaturen aufgrund der als Absolutwerte geringen Veränderungen von untergeordneter Bedeutung. In den Ergebnissen der Vorbetrachtungen erweist sich jedoch als problematisch, dass diese die quantitativen Relationen der Verdunstungs-Massenströme bei zwei Emissionsflächen z.T. nicht korrekt wiedergeben. Eine Klärung, bspw. vor dem Hintergrund der personenbedingten Wärmeemission, bedarf jedoch weiterer Analysen. Die Anpassung der Lüftungsbedingungen, die vor dem Hintergrund der anderen Untersuchungsergebnisse den tatsächlichen Versuchsbedingungen näherkommt, führt zur Verminderung der berechneten Stofffreisetzung. Die errechneten Luftgeschwindigkeiten liegen außerhalb (gem. Weidlich und Gmehling) bzw. am unteren Ende (gem. Mackay und Matsugu) der Anwendungsbereiche der berücksichtigten Verdunstungsmodelle. Gleichzeitig bilden diese Geschwindigkeiten, z.B. in Anbetracht der aus technischen Regelwerken an Arbeitsbedingungen gestellten Anforderungen¹¹⁰, für den Arbeitsschutz interessante Größenordnungen.

Als Schlussfolgerung verfügen die Verdunstungsmodelle unter derartigen Rahmenbedingungen über keinen Validitätsnachweis und sind für die WEA zunächst ungeeignet. Vor einer weiteren Berücksichtigung sind ergänzende Untersuchungen erforderlich, die die Anwendungsbedingungen und die Möglichkeiten eines Einsatzes weiter klären.

Die Konzentrationsverläufe der Ausbreitungsrechnungen auf Grundlage der mit den Verdunstungsmodellen berechneten Emissions-Massenströme weisen die zu erwartenden Unterschätzungen auf. Die Abweichungen belaufen sich allerdings teilweise auf geringere absolute Werte als angenommen. Dieses Verhalten sowie die festgestellten Besonderheiten (einzelfall- und positionsabhängige Annäherung an Messwerte) sind mutmaßlich auf eine günstige Position dieser Messpunkte sowie das komplexe räumliche Zusammenwirken unterschiedlicher Strömungsvorgänge zurückzuführen. Einen Hinweis darauf erbringt z.B. die Relation der Konzentration

¹¹⁰ Vgl. z.B. Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A3.6 "Lüftung" [100].

an Messpunkten in Bodennähe sowie in höheren Raumbereichen (ggf. Einfluss der in Relation zur Umgebung höheren Stoffdichte von Isopropanol) und in Nähe zum Personenaufenthalt bzw. der entstehenden wärmebedingten Auftriebsströmung (Beeinflussung der Strömung durch Wärmefreisetzung). Darüberhinaus weist kein Berechnungsszenario dieses Teilschritts in allen Messpunkten gleichzeitig eine geschlossene Annäherung an die gemessenen Konzentrationsbedingungen auf. Die in den vorherigen Untersuchungen des Ausbreitungsmodells festgestellten Erkenntnisse, z.B. zur Anpassung der Lüftungsbedingungen oder zu ortsbezogenen Relationen, bleiben jedoch sinngemäß bestehen. Hinsichtlich der geschlossenen Anwendung der WEA wird die Validität aufgrund der Unterschätzung der Stofffreisetzung durch die Verdunstungsmodelle bei deren Verwendung nicht nachgewiesen.

Zusammenfassend erbringt Untersuchungsschritt 2 den Nachweis, dass die getroffenen verfahrensinternen Schnittstellen funktionsfähig gestaltet und anhand des Ausbreitungsmodells FDS valide Ergebnisse für zeit- und ortsabhängige Konzentrationsverläufe möglich sind. Diese Ergebnisse basieren u.a. auf einer lediglich geringen Anpassung der Freisetzungsfläche durch Äquivalenzverhältnisse bei teils zeitbezogen gemittelten Rahmenbedingungen, die auch mit Schwankungen wiedergegeben werden können. Aufbauend auf den aus dem ersten Untersuchungsschritt bekannten Ergebnissen bestätigen bzw. ergänzen die Analysen die erarbeiteten Anwendungsbedingungen wie folgt:

- Erfordernis einer genauen Abschätzung von Lüftungsbedingungen, bei der die Zu- und Abluft abgestimmt und (bei Streuungen über einen Größenbereich) tendenziell geringe Werte angesetzt werden,
- genaue Abschätzung von Zuluft- und ggf. Oberflächentemperaturen an relevanten Positionen,
- genaue Erfassung der Stofffreisetzung als bestimmender Faktor der anschließenden Ausbreitungsberechnungen und Konzentrationsbedingungen und
- Beachtung von Zeitabhängigkeiten der Eingangsparameter, sofern sich diese über eine größere Spanne erstrecken und die Wiedergabe sinnvoll ist.

Eine Nutzung des Ausbreitungsmodells als abschätzende Vorbetrachtung zu emissionsbestimmenden Verhältnissen ist grundsätzlich möglich, aufgrund fehlender Messwerte erbringen die Untersuchungen jedoch keinen quantitativen Genauigkeitsnachweis. Eine Verwendung von Berechnungsergebnissen, z.B. zu Temperaturverläufen, erfolgt darüberhinaus sinnvoll zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit der Konzentrationsverläufe bzw. zur Identifizierung von Parametrisierungs- oder Berechnungsfehlern. Der Validitätsnachweis beschränkt sich auf das Ausbreitungsmodell, da die verwendeten Emissionsmodelle die gemessenen Emissions-Massenströme deutlich unterschätzen. Dadurch liegen auch die Ergebnisse der Ausbreitungsberechnungen bei geschlossener Anwendung der WEA unter den Messwerten. Die Gesamtergebnisse sind für sicherheitsorientierte Betrachtungen nicht geeignet.

Ergänzende Sensitivitätsuntersuchungen

Die weiteren Sensitivitätsuntersuchungen ergänzen die in den Untersuchungsschritten 1 und 2 gewonnenen Erkenntnisse: Erwartungsgemäß führen in den Berechnungsszenarien mit variiertem Lüftung die verringerten Volumenströme zu einer globalen Zunahme in den berechneten Konzentrationsverläufen, was aufgrund der Begrenzung der abgeführten (Gesamt-) Stoffmasse plausibel ist. Dass bei Erhöhung der Volumenströme die Stoffkonzentrationen gleichermaßen abnehmen, weist den kausalen Zusammenhang zwischen Lüftungsdimensionierung und Stoffkonzentration nach, der aus der messtechnischen Praxis hinreichend bekannt ist (vgl. [9]). Aus

dem verminderten Luftaustausch resultieren gleichzeitig abnehmende Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Turbulenzen und somit "ruhigere" Strömungsbedingungen, welche die Verringerung der Schwankungen in den Berechnungsergebnissen verursachen. Das ruhigere Strömungsbild entsteht neben der allgemeinen Absenkung der Volumenströme auch aus dem Abgleich von Zu- und Abluft. Die festgestellten Temperaturentwicklungen stützen die Interpretationen zusätzlich, in denen eine verringerte Zuluft auch eine Begrenzung der Temperaturabnahme und damit der -unterschiede verursacht.

Die in den Messungen nicht nachgewiesenen Konzentrationszunahmen am Boden im Falle der höchsten Lüftungsrosselung werden auf den örtlichen Zusammenhang zwischen den Zu- und Abluftflächen und dem Aufenthaltsort der Person zurückgeführt: Eine dreidimensionale Auswertung der Strömungsverhältnisse zeigt, dass in den Berechnungsergebnissen ein thermisch bedingter Auftrieb in der Nähe der Person auftritt, welcher der zugeführten Luft entgegensteht. Infolge dessen ist die Luftströmung in Bodennähe verringert, was zu verminderten Ver- bzw. Aufwirbelungen führt. Dichtebedingt kommt es zu einer Anreicherung von Isopropanoldämpfen in Bodennähe. Diese Abweichung im Vergleich mit den Messergebnissen weist auf die Unterschätzung der Lüftungsbedingungen in diesen Berechnungsszenarien hin, die nicht in allen Berechnungsfällen aufgrund der Variation der tatsächlichen Lüftung während der Versuchsdurchführung auftritt. Die Abweichungen liegen jedoch mit höheren Konzentrationsniveaus in den Berechnungsergebnissen aus Sicht des Arbeitsschutzes auf der sicheren Seite. Im Rückschluss folgt, dass die anderen Berechnungsszenarien die tatsächlichen Lüftungsbedingungen offenbar näherungsweise wiedergeben.

Als Besonderheit tritt in Fällen ohne Personenaufenthalt eine allgemeine Annäherung der Berechnungsergebnisse an die gemessenen Konzentrationsverläufe durch ortsspezifische Zu- und Abnahmen auf. Dies zeigt neben der Relevanz des Personenaufenthalts bzw. der Berücksichtigung der entsprechenden Wärmefreisetzung, dass mit zunehmender Genauigkeit der Abschätzung von Eingangsparametern - an dieser Stelle der thermischen Einflüsse und der Lüftungsbedingungen - auch die Genauigkeit der errechneten Luftkonzentrationen zunimmt.

Die Ergebnisse bei Annahme gleicher Raum- und Zulufttemperaturen verdeutlichen den Temperatureinfluss auf die Ausbreitungsrechnungen: Aus der Abstimmung folgt allgemein eine Abnahme der Dichteunterschiede zwischen Raum- und Zuluft. In den Berechnungen entsteht daraus eine Beruhigung der Strömungsbedingungen, in dem sich dichtebedingte Auf- und Abströmungen und damit gleichzeitig vertikale Turbulenzen verringern. Neben der Schwankungsbegrenzung verursachen die verringerten dichtebedingten Strömungen die ortsbezogene Beibehaltung der Konzentrationsverläufe bzw. deren geringfügige Zunahme. Die Beibehaltung an Messpunkten unterhalb des Tischniveaus bzw. auf dem Tisch weist die Gleichheit der prinzipiellen Strömungsrichtungen nach, die Sensitivität des Modells ist hier eher gering. Die Zunahmen in Bodennähe resultieren unmittelbar aus der Verringerung der Durchwirbelung, da die Strömungseinflüsse auf dieser Ebene - bei unterschiedlichen Temperaturen durch Abtriebsströmungen verursacht, die nunmehr alleine auf den Eintrittsgeschwindigkeiten der Zuluft beruhen - begrenzt werden. Es kommt auch hier zu dichtebedingten Isopropanolanlagerungen. Die demgegenüberstehende Konzentrationsabnahme bei Berechnungen ohne Personenaufenthalt bestärkt diese Interpretation, da in diesen Fällen der zusätzliche Thermikeffekt entfällt: In den ursprünglichen Berechnungsszenarien führt das dichtebedingte Absinken zu einer Verstärkung der Abtriebsneigung der Isopropanol-Dämpfe ("Herunterdrücken" des Stoffes). Die Annäherung an die Messwerte wird in diesem Zusammenhang auf den komplexen Effekt der Lüftungsparametrisierung (hier: im Vergleich mit den übrigen Sensitivitätsuntersuchungen offenbar überschätzt) zurückgeführt. Die gegenläufigen Ergebnisse im Szenario "2012-6", die sich auch in "2011-6" und "2013-6" (gleiche Messaufbauten) andeuten, beruhen mutmaßlich auf der Anordnung des Messpunkts auf dem Tisch. Augenscheinlich erfolgt hier in den Berechnungen die Beibehaltung der Koppe-

lung zwischen Überschätzung des wärmebedingtem Stoffauftriebs, dem Abstand zur Emissionsquelle sowie der Ausrichtung der Messwerterfassung. Dies entspricht den in den ursprünglichen Berechnungen festgestellten Erkenntnissen.

Die festgestellten Temperaturverläufe sind aufgrund der Nähe zum Aufenthaltsort der Person (erhöhte Raumtemperatur) bzw. deren Entfall sowie der konvektiven Wirkung der Strömungsgeschwindigkeit der (Zu-) Luft am Messpunkt in der Nähe der Zuluftöffnung plausibel. Die Ergebnisse verdeutlichen erneut den Einfluss des Personenaufenthalts auf die Strömungsbedingungen innerhalb der Ausbreitungsrechnungen.

Die Vergleichsergebnisse mit Angleichung der Temperaturen in Relation zu Messwerten und anderen Berechnungen lassen den Schluss zu, dass die Bedeutung der Parametrisierung von Temperaturunterschieden zwischen Raum- und Zuluft bei sonst unklaren Lüftungsbedingungen eher gering ist. Genauere Konzentrationsverläufe beruhen offenbar auf gleichmäßigeren Strömungsbedingungen, denen eine Temperaturfestlegung bei unklaren Verhältnissen widerspricht.

6.2.1.5 Schlussfolgerungen

Die Berechnungs- bzw. Vergleichsergebnisse der Untersuchungsschritte 1 und 2 des DGUV-Forschungsprojekts FP-354 sowie der ergänzenden Sensitivitätsuntersuchungen zu variierten Lüftungsbedingungen und Temperaturen erbringen grundsätzliche Erkenntnisse und Aussagen. Die nachfolgende Aufstellung führt die gewonnenen Ergebnisse aller zusammengehörenden Untersuchungen zu Aussagen bezüglich der Validität von Ausbreitungsmodell und Gesamtablauf der WEA sowie zu Anwendungsbedingungen und -grenzen zusammen:

1. *“Die Module des Berechnungsverfahrens sind methodisch als auch fachlich-inhaltlich aufeinander abgestimmt. Die Schnittstellen zwischen den Modulen sind kompatibel, alle erforderlichen Eingangsparameter der berücksichtigten Modelle werden geschlossen erfasst und zur weiteren Verwendung bereitgestellt.*
2. *Die in den vorliegenden Untersuchungen einbezogenen Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu bzw. Weidlich und Gmehling sind unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht valide (vgl. Untersuchungsschritt 2). Infolge dessen kann die Validität des Berechnungsverfahrens als geschlossene Anwendung nicht festgestellt werden.*
3. *Das für die Berechnung der Stoffausbreitung berücksichtigte Modell FDS ist für die Konzentrationsermittlung unter der Voraussetzung bekannter Emissions-Massenströme und für die in Untersuchungsschritt 2 aufgestellten Fallbetrachtungen valide. Für die Untersuchungen zur unmittelbaren Gaseinleitung in den Versuchsraum wird dagegen die Validität nicht nachgewiesen (vgl. Untersuchungsschritt 1). Als Hintergrund wird eine unvollständige Ermittlung von Rahmenbedingungen sowie die nicht vollumfänglich kontrollierte Stofffreisetzung vermutet. Wesentliche ergebnisbeeinflussende Faktoren sind die Emissionsbedingungen (insbesondere Darstellung der Freisetzungsfläche und Abschätzung des Emissions-Massenstroms) und die Lüftungsverhältnisse, die als Voraussetzung möglichst detailliert bestimmt werden müssen. Ist eine genaue Festlegung dieser Parameter für die Berechnungen nicht möglich, empfiehlt es sich, ggf. mehrere Berechnungen mit unterschiedlicher Parametrisierung (z.B. im Sinne von Worst-Case-Betrachtungen) durchzuführen. Bei der Darstellung der Emissionsfläche ist zur Beibehaltung der Charakteristik der Freisetzungsgeschwindigkeit auf die Bildung von Äquivalenzverhältnissen, die über geringe Anpassungen hinausgehen, zu verzichten. In derartigen Fällen entsprechen Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung mit einer großen Wahrscheinlichkeit nicht tatsächlichen Konzentrationsbedingungen, da sich auch das Ausbreitungsverhalten verändert.*

4. *Im Hinblick auf die unterschiedlichen Teilergebnisse der methodischen Untersuchungsschritte kann keine allgemeine Validität des Modells zur Ausbreitungsberechnung bestätigt werden. Der Einsatz des Modells ist daher bislang auf Anwendungsfälle begrenzt, die mit den Rahmenbedingungen im Untersuchungsschritt 2 vergleichbar sind. (...)*
5. *Die innerhalb der Konzeption des Berechnungsverfahrens berücksichtigten Verdunstungsmodelle müssen auf ihre Anwendbarkeit weiter untersucht werden. Zum vollumfänglichen praktischen Einsatz des Berechnungsverfahrens ist es auf diesen zusätzlichen Untersuchungen aufbauend ggf. erforderlich, weitere bzw. andere Modelle und Abschätzungsmöglichkeiten zur Ermittlung der Emissionsbedingungen zu integrieren. In diesem Fall sind die vorhandenen Schnittstellen zwischen einzelnen Modellen (insbesondere Anpassungsfaktoren zur Einheitenkonvention) ebenfalls zu überprüfen und ggf. anzupassen.”[95]*
6. Das Ausbreitungsmodell gibt den kausalen Zusammenhang zwischen der Dimensionierung der Lüftungsbedingungen und den entstehenden Konzentrationshöhen realitätsgemäß wieder. Aus der Verwendung geringer Volumenströme resultieren höhere Konzentrationsverläufe, was bei unklaren Lüftungsbedingungen Sicherheitsfaktoren in der Ausbreitungsrechnung erbringt.
7. Die Abstimmung von Zu- und Abluftbedingungen sowie der Raum- und der Zulufttemperaturen bewirken jeweils geringere Konzentrationsschwankungen, die u.a. präzisere Ergebnisse zulassen.
8. Die Darstellung des Personenaufenthalts stellt ebenfalls einen relevanten Einflussfaktor auf die berechneten Strömungsbedingungen und Konzentrationsverläufe dar. Da das Ausbreitungsmodell Personen als Objekt mit Wärmeemission betrachtet, müssen neben Personen auch ggf. vorhandene heiße Oberflächen und andere Wärmefreisetzungen Berücksichtigung finden.
9. Neben der möglichst genauen Bemessung der Lüftungsbedingungen beeinflusst die berücksichtigte Temperaturhöhe die Ergebnisse des Ausbreitungsmodells. Temperaturunterschiede zwischen Zu- und Raumluft haben bei nicht genau bekannten Verhältnissen (z.B. aus der Steuerung raumluftechnischer Anlagen) für die Konzentrationsberechnung eine untergeordnete Bedeutung. Die Abschätzung der absoluten Raumlufttemperatur ist dagegen ergebnisrelevant.
10. Die Genauigkeit der Eingangsparameter beeinflusst die Genauigkeit der berechneten Konzentrationsverläufe.

Die gewonnenen Erkenntnisse differenzieren sich u.a. nach verschiedenen Formen der Stofffreisetzung und gelten insbesondere für die verwendete Luftführung des Versuchsraums (Zu- und Abluftöffnungen in der Raumdecke). Für den Einsatz des in Kap. 5 entwickelten Konzepts der WEA bzw. des Ausbreitungsmodells FDS innerhalb des Moduls zur Erfassung der Stoffausbreitung bei Arbeitsschutz-Betrachtungen leiten sich verschiedene Hinweise und Bedingungen ab. Der sinnvolle Einsatz des Verfahrens zur Berechnung belastbarer Ergebnisse bzw. zur Abschätzung stofflicher Gefährdungen von Beschäftigten erfordert deren Berücksichtigung:

1. *“Der betrachtete Stoff ist bei der Ausbreitung (d.h. Stofftransport an die Luft des Arbeitsraums) mitsamt seiner Eigenschaften bekannt¹¹¹.*
2. *Die Emissionsbedingungen sind bekannt, insbesondere kann der Emissions-Massenstrom definiert bzw. detailliert bestimmt werden. Weiterhin ist die Freisetzungsfläche bekannt.*

¹¹¹ Die Bedingung besteht aus der allgemeinen Konzeption des Berechnungsverfahrens und basiert nicht auf den durchgeführten Validierungsuntersuchungen.

3. Das Modul zur Erfassung der Stoffemission verzichtet auf die Anwendung von Berechnungsmodellen. Die Abschätzung und Umrechnung des flächenbezogenen Emissions-Massenstroms (Schnittstelle zum Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung) basiert entweder auf - z.B. aus Messungen - bekannten Werten oder wird aus Analogiebetrachtungen ermittelt.
4. Die Lüftungsbedingungen des zu untersuchenden Arbeitsraumes sind bekannt und über Zu- und Abluftvolumenströme sowie -flächen dargestellt. Zeitabhängige Änderungen sind quantifizierbar und werden in die Parametrisierung des Ausbreitungsmodells einbezogen. Andernfalls werden tendentiell niedrige Werte innerhalb des Schwankungsbereichs angenommen, die Volumenströme aufeinander abgestimmt und Ausbreitungsberechnungen mit verschiedenen Konstellationen (als Sensitivitätsuntersuchungen) durchgeführt.
5. In der Parametrisierung des Ausbreitungsmodells kann die Emissionsfläche mit geringen Abweichungen zu den tatsächlichen Abmessungen dargestellt werden. Die Bildung von Äquivalenzverhältnissen, die über die Auf- oder Abrundung auf die Gitterweite der verwendeten Berechnungsfelder hinausgeht (z.B. in 5 cm-Schritten), ist nicht erforderlich. Die Absolutwerte der tatsächlichen Flächenausdehnungen werden näherungsweise beibehalten. Die Charakteristik der Emissionsgeschwindigkeit bleibt auf diese Weise in den Ausbreitungsberechnungen bestehen.
6. Die zeitabhängigen Schwankungen des Emissions-Massenstroms werden entweder in den Berechnungen zur Stoffausbreitung unmittelbar berücksichtigt oder durch geeignete Mittelwerte approximiert.
7. Die Zuluft- und Umgebungstemperaturen bewegen sich im allgemein üblichen klimatischen Bereich¹¹² und können näherungsweise bestimmt werden. Sind die Temperaturen nicht genau bekannt, müssen Berechnungen mit verschiedenen Konstellationen (insbesondere Relation der Temperaturen als "Sommer-" bzw. "Winterfall") durchgeführt werden.
8. Die Berechnungen sind auf Messpunkte im Atembereich von Beschäftigten (Gesichtspunkt des Arbeitsschutzes), die über wärmeemittierende Objekte innerhalb des Ausbreitungsmodells dargestellt werden, ausgerichtet. Für diese Messpunkte ist der Abstand zur Freisetzungsoberfläche von untergeordneter Bedeutung. Andernfalls kann für Messpunkte in unmittelbarer Nähe zur Freisetzungsoberfläche nicht von einer korrekten Ausbreitungsberechnung ausgegangen werden, da die Konzentrationsverläufe ggf. erheblich unterschätzt werden.
9. Sofern Berechnungen zu Geschwindigkeiten oder Temperaturen, z.B. als Vorbetrachtung zur Parametrisierung eines Emissionsmodells, erforderlich sind, müssen die entsprechenden Messpunkte an den tatsächlich relevanten Positionen angeordnet werden. Weiterhin empfiehlt sich bei Berechnungen zur Stoffausbreitung die Erfassung der Raumtemperatur zur Abschätzung, ob die Ergebnisse physikalisch sinnvoll sind.
10. Zur Bewertung von berechneten Stoffkonzentrationen werden geeignete Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Diese werden entweder bei der Parametrisierung von Emission und Lüftung bereits einbezogen oder - hier empfohlen und wenn möglich - bei der bewertenden Gegenüberstellung von zusammengefassten Expositionen zu (Arbeitsplatz-) Grenzwerten verwendet.
11. Bei der Bewertung anhand von (Arbeitsplatz-) Grenzwerten werden geringe Grenzwertüberschreitungen durch die berechneten Stoffkonzentrationen als kritisch betrachtet. Zur Interpre-

¹¹² Die Bedingung besteht aus der allgemeinen Konzeption des Berechnungsverfahrens und vor dem Hintergrund üblicher Arbeitsbedingungen. Berechnungen mit erhöhten Temperaturen sind über die Validierungsarbeiten im Rahmen brandschutztechnischer Fragestellungen prinzipiell abgedeckt, allerdings wäre dann ein Personenaufenthalt vor dem Hintergrund des Arbeitsschutzes fraglich.

tation des Grenzwertvergleichs werden auch die verwendeten Sicherheitsfaktoren herangezogen.” [95]

12. Sowohl der Personenaufenthalt als auch andere wärmeemittierende Objekte oder Flächen werden als Strömungseinflüsse explizit berücksichtigt.
13. Die in die Parametrisierung eingehenden Werte von Raum- und Zulufttemperatur unterscheiden sich nur, wenn beide Werte explizit bekannt sind. Andernfalls wird die Zulufttemperatur in gleicher Höhe wie die Raumlufttemperatur angenommen. Die Raumlufttemperatur muss dagegen möglichst realitätsnah bestimmt und in die Ausbreitungsrechnungen eingebunden werden. Ggf. sind mehrfache Berechnungen, z.B. als “Sommer-” oder “Winterfall”, zur Bestimmung der kritischeren Verhältnisse erforderlich.

6.2.2 Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor

Das IPA der DGUV unterhält ein sog. Expositionslabor, das der Durchführung von Humanuntersuchungen mit gezielten Expositionen luftgetragener Substanzen, z.B. zur Untersuchung der körpereigenen Metabolisierung oder Grenzwertableitung, dient. Die Versuche beruhen auf der gezielten Einstellung von Luftkonzentrationen durch Kontrolle der Lüftungs- und Umgebungsbedingungen sowie der gezielten Stofffreisetzung in den Versuchsraum während eines definierten Personenaufenthalts. Typischerweise dauern die Versuche mehrere Stunden bei gleich hohen, stationären Luftkonzentrationen an, wobei die Versuchsparameter zeitlich konstant bleiben [96–98].

Zur Prüfung und Kalibrierung der Messgeräte und der Lüftungssteuerung werden regelmäßig Kalibrierversuche durchgeführt. Im Gegensatz zu den Expositionsversuchen beruhen diese auf der gezielten Herbeiführung von zeitabhängigen Konzentrationsverläufen, die

- einen Konzentrationsaufbau bei definierter Stofffreisetzung bis hin zu stationären Bedingungen (sog. Anfahrkurven) generieren sowie
- die Stofffreisetzung aus einer konstanten Luftkonzentration heraus definiert beenden, so dass bei Aufrechterhaltung der Raumlüftung ein gezielter Konzentrationsabbau erfolgt (sog. Abklingkurven).

Die Anfahr- und Abklingkurven werden ohne zielgerichtete Personenexposition erfasst sowie samt der Lüftungs- und Umgebungsbedingungen dokumentiert und ausgewertet. Aufgrund der bekannten Geometrie, der dokumentierten Rahmenbedingungen sowie der definierten Stofffreisetzung samt Messung von Luftkonzentrationen an festgelegten Positionen eignen sich die Daten der Anfahr- bzw. Abklingkurven für Validierungsuntersuchungen vor allem des Ausbreitungsmodells FDS. Die vorgestellten Berechnungen beruhen auf durch das IPA hierzu zur Verfügung gestellten Datensätzen zu ausgewählten Kalibrierversuchen¹¹³.

6.2.2.1 Rahmenbedingungen

Über die aufgeführten Erläuterungen der generellen Rahmenbedingungen hinaus, die nicht einzelfallabhängig variiert wurden, sind die Parameter im zugehörigen Arbeitssystem (vgl. Anhang F.1) zusammengefasst. Die Beschreibung der berücksichtigten Kalibrierversuche benennt die Gestaltung der Versuchsbedingungen.

¹¹³ Die Bereitstellung der verschiedenen Datensätze basiert auf einer Kooperationsvereinbarung des Fachgebiets Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit der Bergischen Universität Wuppertal und dem IPA, die zum Zweck der Validierungsuntersuchungen getroffen wurde. Urheberrechte der Versuche und Referenzwerte verbleiben beim IPA.

6.2.2.1.1 Geometrie und Einrichtung

Der Versuchsraum des Expositionslabors verfügt bei Berücksichtigung der lichten Innenmaße über eine Länge von 3,92 m und eine Breite von 2,915 m bei einer Höhe von 2,50 m, das Rauminvolumen beträgt 28,567 m³. Der Raum ist vollständig mit inerten Metalloberflächen versehen, um ungewünschten Reaktionen mit Versuchsstoffen vorzubeugen.

Der Raum besitzt zwei Türen, die bei Versuchsdurchführung geschlossen sind. Fenster bestehen zur Versuchsbeobachtung aus Nebenräumen an beiden Längsseiten sowie an einer Querseite ins Freie, die jedoch allesamt nicht offenbar sind. Der Versuchsraum bildet ein in sich geschlossenes System, das gegenüber den angrenzenden Bereichen während der Versuchsdurchführung - mit Ausnahme der Be- und Entlüftung - luftdicht abgeschlossen ist. An den Türen befinden sich dementsprechende Dichtungen.

Die Untersuchungen zur Personenexposition repräsentieren Arbeitssituationen und dauern oftmals mehrere Stunden. Zur Darstellung von Tätigkeiten sind innerhalb des Versuchsraums daher vier Tisch-Stuhl-Kombinationen mit Computerarbeitsplätzen, jeweils zueinander abgetrennt, an einer Längsseite aufgestellt, die aus beschichteten Holzwerkstoffen bestehen. Die Tischhöhen betragen z.B. 0,75 m bei Tiefen von 0,77 m. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Aufstellung von Ergometern oder anderen Einrichtungsgegenständen [96, 98].

6.2.2.1.2 Lüftung, Stoffemission und Umgebungsbedingungen

Eine raumlufttechnische Anlage kontrolliert vollständig die gekoppelte Be- und Entlüftung des Versuchsraums. Die vorhandenen Abdichtungen der Türen sowie der weiteren konstruktionsbedingten Öffnungen schließt eine natürliche Lüftung aus. Zur Zuluftführung stehen an den Längsseiten in unmittelbarer Bodennähe gleichmäßig verteilt 7 bzw. 4 runde Zuluftöffnungen (sog. Quellauslässe) mit einer Fläche von jeweils 0,00385 m² (Durchmesser 0,07 m, Abstände der Mittelpunkte 0,50 m bzw. 0,55 m) zur Verfügung. Die Abluftführung erfolgt über zwei in der Raumdecke angeordnete Öffnungen (Abstand Außenwand 0,75 m bzw. 3,18 m, Abstand Trennwand Vorbereitung 1,30 m), die eine Fläche von jeweils 0,0341 m² (Länge: 0,31 m, Breite: 0,11 m) aufweisen. Lamelleneinsätze bzw. Lüftungsgitter schränken die für die Abluftführung zur Verfügung stehende Fläche ein. Zur Vermeidung von Über- oder Unterdrucksituationen während der Versuche steuert die raumlufttechnische Anlage die Zu- und Abluftführung so, dass sich die Gesamtvolumenströme entsprechen.

Der Luftwechsel beträgt bei Humanuntersuchungen zwischen 300 m³/h und 450 m³/h. Bei den Kalibrierversuchen erfolgte der Betrieb der Lüftungsanlage bei Luftwechselzahlen¹¹⁴ (Angaben aus den Datensätzen) zwischen ca. 10 und 11,5, so dass die Gesamt-Zu- bzw. Abluftvolumenströme in etwa 300 – 340 m³/h betragen. Die Volumenströme wurden konstant über die gesamte Versuchsdauer aufrechterhalten und kontrolliert, Abweichungen traten durch die druckbedingte Steuerung nicht auf [98].

Neben der Zuluftführung dienen die entsprechenden Öffnungen in Bodennähe der Emission der Versuchsstoffe. Entsprechend der beabsichtigten Raumluftkonzentrationen erfolgt eine anlagentechnische Einmischung des Stoffs während der Luftaufbereitung in Abhängigkeit zu Volumenstrom und thermodynamischen Umgebungsbedingungen. Eine dafür vorgesehene und bemessene Regelstrecke stellt die gleichmäßige Stoffverteilung in der Zuluft sicher, so dass aus allen Öffnungen gleiche Mischungsverhältnisse emittieren.

Die Prinzipskizzen des Versuchsraums (siehe Abb. 6.7) verdeutlichen die Geometrie samt der Lüftungsöffnungen. Einen weiteren Eindruck inklusive Einrichtung vermittelt Abb. 6.8.

¹¹⁴ Anzahl des lüftungstechnischen Austauschs des gesamten Rauminvolumens durch Frischluft innerhalb einer Stunde in [1/h], aus der Multiplikation mit dem Rauminvolumen folgen die jeweils gesamten Zu- bzw. Abluftvolumenströme.

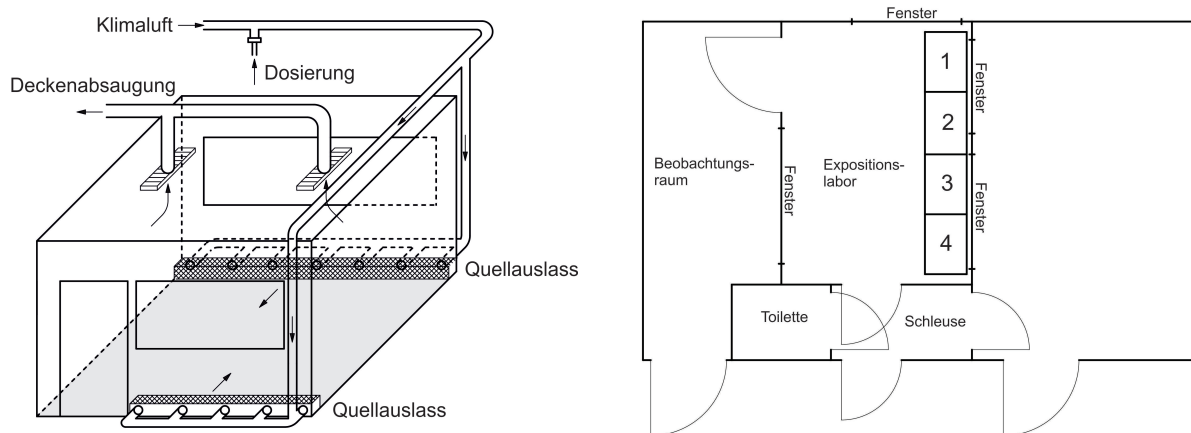


Abbildung 6.7: Prinzipskizzen des IPA-Expositionslabors [101]



Abbildung 6.8: Innenansichten des IPA-Expositionslabors [101]

In Verbindung mit der vorgehaltenen Lüftungstechnik besteht die Möglichkeit, die thermodynamischen Umgebungsbedingungen der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte gezielt einzustellen. Die raumlufttechnische Anlage regelt dagegen nicht den Luftdruck innerhalb des Versuchsraums, sondern hält einen konstanten Druckunterschied zwischen Versuchsraum und der Umgebung aufrecht.

Für die Kalibrierversuche steht keine abschließende Dokumentation für Umgebungstemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck zur Verfügung. Allerdings kann aus den üblicherweise eingestellten Bedingungen von ca. $22^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}$ bzw. 40% – 50% rel. Luftfeuchte auf die Parameter zurückgeschlossen werden, für den Luftdruck ist eine Annahme erforderlich.

6.2.2.1.3 Messung von Luftkonzentrationen

Bei der Durchführung von Expositionsversuchen erfolgt die Messung von Luftkonzentrationen im unmittelbaren Atembereich der anwesenden Personen. Die Messgeräte (in den Kalibrierversuchen: Massenspektrometer "airsense", Fa. MS4 Analysentechnik GmbH¹¹⁵) sind im Vorbereitungsraum angeordnet und mit den Messpunkten an den verschiedenen Arbeitsplätzen über Schläuche verbunden. Die Geräte saugen aktiv Raumluft an und werten diese hinsichtlich der Zusammensetzung aus [96, 98].

¹¹⁵ Das Gerät verwendet als Messprinzip die sog. chemische Ionisation, bei der ein ionisiertes Reagenz mit dem nachzuweisenden Stoff chemisch zu detektierbaren Molekülen reagiert [98, 102].

Die verwendeten Daten beruhen auf Messungen zur Luftkonzentration der verschiedenen Versuchsstoffe am Messpunkt "Messplatz 3" (Anordnung: Abstand Außenwand 2,37 m, Abstand Wand Vorbereitung 0,80 m, Höhe über Fußboden 1,72 m). Das Messintervall (Dauer zwischen zwei Messungen bzw. dokumentierten Auswertungen der Luftkonzentrationen) betrug 2,002 s. Die Gestaltung des Expositionslabors beabsichtigt, an allen Stellen des Versuchsraums homogene Luftkonzentrationen zu erzielen. Die am "Messplatz 3" erfassten Werte sollten daher charakteristisch für den gesamten Raum sein. Da keine weiteren Werte aus den vorliegenden Datensätzen des IPA zur Verfügung stehen, nimmt die Validierung auf diese Versuchsanordnung als eindeutige Referenz Bezug¹¹⁶.

6.2.2.1.4 Personenaufenthalt und Luftdurchmischung

Während der zur Validierung genutzten Kalibrierversuche erfolgte kein reglementierter bzw. dokumentierter Personenaufenthalt, da die Versuche nicht auf Humanexpositionen ausgerichtet waren. Allerdings hielt sich u.U. dennoch eine Person zu Kontrollzwecken innerhalb des Versuchsraums auf, ohne dass dies protokolliert wurde. Da die Verwendung des Ausbreitungsmodells im Sinne des Arbeitsschutzes auf einen Personenaufenthalt abzielt, bietet sich dieser Umstand als Ausgangspunkt von Sensitivitätsbetrachtungen an.

Der Aufbau des Versuchsraums dient der Einstellung und Aufrechterhaltung homogener Konzentrationsbedingungen, um bei tatsächlichen Humanuntersuchungen eine gleichmäßige Exposition von Personen - unabhängig vom konkreten Aufenthaltsort innerhalb des Raums - zu gewährleisten. Zur Erprobung der Wirkung einer zusätzlichen Luftverwirbelung auf die Homogenität von Luftkonzentrationen wurde in den Kalibrierversuchen ein handelsüblicher Ventilator im Versuchsraum platziert¹¹⁷, der die Strömungsbedingungen zusätzlich beeinflusst. Neben der Umwälzung der Luft innerhalb des Versuchsraums bzw. der Beeinflussung der Strömungswege von Zu- und Abluft erfolgt kein weiterer Lufteintrag oder -austrag.

Für die Förderleistung des Ventilators stehen keine Werte zur Verfügung, da keine Ermittlung während der Versuchsdurchführung im Expositionslabor stattfand und das Gerät darüber hinaus für eine genaue Prüfung nicht zur Verfügung stand. Der Betrieb erfolgte während der Versuche auf "mittlerer Regulierungsstufe" [98]. Die für die Validierungsuntersuchungen daher erforderliche Abschätzung der Förderleistung zog vereinfachende Messungen von Luftgeschwindigkeitsprofilen über die Fläche eines vergleichbaren, handelsüblichen Ventilators heran. Der konstante Luftvolumenstrom des Ventilators betrug ca. $810 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Fläche von $0,075 \text{ m}^2$ (entspricht einer mittleren Luftgeschwindigkeit von $3,00 \text{ m/s}$), der als Annahme in den Berechnungen Berücksichtigung fand.

6.2.2.2 Untersuchungsziele

Gemäß den Erläuterungen in Kap. 6.2.2.1 erfolgt die Stofffreisetzung im Expositionslabor durch eine definierte Gasfreisetzung über die Zuluftöffnungen (Quellauslässe) im Bodenbereich. Die zur Verfügung gestellten Datensätze beinhalten - neben der Geometrie und den allgemeinen thermodynamischen Umgebungsbedingungen - Werte zur konstanten Lüftungssituation und gleichmäßigen Freisetzung bzw. deren gezielter Unterbrechung eines bekannten Stoffs innerhalb

¹¹⁶ In Nebenbetrachtungen war der Nachweis der ortsbezogenen Homogenität und Strömungswege Betrachtungsgegenstand, dessen Untersuchung gleichzeitig mit den Validierungsarbeiten erfolgte. Da diese Ergebnisse zwar für die Gestaltung bzw. Optimierung der Humanuntersuchungen interessant sind, jedoch nicht zur Validierung des Ausbreitungsmodells beitragen, wird an dieser Stelle auf die Erläuterung verzichtet.

¹¹⁷ Die Analyse der Strömungsbedingungen bzw. der Sensitivität homogener Luftkonzentrationen durch die Ein- bzw. Abschaltung des Ventilators ging ebenfalls in die genannten Nebenbetrachtungen ein. Über die Berücksichtigung des Ventilators als konkrete Rahmenbedingung der Konzentrationsermittlung sowie zur Sensitivitätsanalyse hinaus wird die ortsbezogene Homogenität der Stoffkonzentrationen an dieser Stelle nicht erörtert.

des Versuchsraums sowie der beabsichtigten und gemessenen Luftkonzentration ("Messplatz 3"). Datensätze von Versuchen mit freier Emission, z.B. durch Verdunstung, oder mit Variation von Lüftungsbedingungen während der Kalibrierversuche (Ausnahme: Betrieb des Ventilators) standen nicht zur Verfügung. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der Kalibrierversuche, insbesondere bei Abklingkurven, ist eine Bewertung von Expositionen nicht zielführend.

Auf Grundlage der Daten beziehen sich die Validierungsuntersuchungen dieses Abschnitts alleine auf die Module der Informationsermittlung sowie der Erfassung der Stoffausbreitung. Die Erfassung der Stofffreisetzung ist über die Ermittlung, Dokumentation und Bereitstellung der Parameter hinaus aufgrund der bekannten Bedingungen hinfällig. Entsprechend dem beschriebenen Ablauf der WEA dienen die vorliegenden Werte als unmittelbare Eingangsparameter der Ausbreitungsrechnungen, was eine Umrechnung zur Einheitenkonvention entsprechend Kap. 6.2.2.4 erfordert. Die Bewertung möglicher Expositionen wird ebenfalls nicht vorgenommen.

Die dargestellten Betrachtungen umfassen somit folgende Ziele:

- Überprüfung der vollständigen Erfassung aller erforderlichen Rahmenbedingungen im Zuge der Informationsermittlung sowie der geeigneten Verknüpfung zum Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung durch die Gestaltung von Schnittstellen;
- Ermittlung der Übertragbarkeit des Brandschutzingenieurmodells FDS auf Betrachtungen des Arbeitsschutzes;
- Beurteilung der Genauigkeit von Berechnungsergebnissen zur Stoffausbreitung und der Sensitivität im Hinblick auf in der praktischen Verwendung ggf. unsichere bzw. nur abschätzbare Eingangsparameter sowie
- Definition von Anwendungsbereichen.

6.2.2.3 Ausgangsdaten der Kalibrierversuche

Die Validierungsuntersuchungen beruhen auf den zur Verfügung gestellten Datensätzen des IPA, die unterschiedliche Stoffe und Rahmenbedingungen einbeziehen. Die verwendeten Versuchsdaten umfassen Abkling- und Anfahrkurven bzw. Kombinationen beider Varianten. Neben diesem generellen Konzentrationsverlauf unterscheiden sich die einzelnen Kalibrierversuche bzw. -daten in den Parametern

- des verwendeten Versuchsstoffs (Ethylacetat, n-Butanol und Propylen),
- der beabsichtigten, definierten Raum- bzw. Zielkonzentration (als Ausgangspunkt des Abklingverhaltens bzw. als anzustrebender Endwert des Konzentrationsaufbaus),
- des aufgrund der Zielkonzentration emittierten Emissions-Massenstroms,
- der geringen (versuchsspezifisch-konstanten) Variation der Lüftungsbedingungen,
- der zeitabhängigen Verwendung des zusätzlichen Ventilators zum Zwecke der zusätzlichen Durchmischung der Raumluft sowie
- des (ggf. zeitweisen, aber nicht dokumentierten) Personenaufenthalts.

Die Verwendung findenden Ergebnisse der Kalibrierversuche sind mitsamt der Versuchsparameter tabellarisch in Anhang G.2.1¹¹⁸ zusammengefasst, der das zugehörige, in Anhang F.1 dargestellte Arbeitssystem ergänzt. Die gemessenen Luftkonzentrationen stehen als tabellarische

¹¹⁸ Die Übersicht verwendet die Bezeichnungen, die den Kalibrierversuchen durch das Expositions-Labor zugewiesen wurde, um die eindeutige Identifizierung weiterhin aufrecht zu erhalten.

Zeitverläufe zur Auswertung zur Verfügung. Die unterschiedlichen zeitabhängigen Konzentrationsbedingungen sind in Anhang H.2.1 zum vereinfachten Überblick visualisiert.

6.2.2.4 Durchgeführte Berechnungen und Parametrisierung

Die Grundlage der Validierungsuntersuchungen bilden die allgemeinen Rahmenbedingungen, die das Arbeitssystem erfasst (vgl. Anhang F.2), sowie die in Kap. 6.2.2.3 aufgeführten versuchsspezifischen Größen. Im Zuge der Parametrisierung des Ausbreitungsmodells - im Sinne der WEA "Modul 3: Erfassung der Stoffausbreitung" - fand eine formale Überprüfung statt, ob alle erforderlichen Parameter für die Berechnungen aus dem Arbeitssystem und der Aufstellung versuchsspezifischer Angaben zur Verfügung stehen und die Schnittstellen der Module "Informationsermittlung" und "Erfassung der Stoffausbreitung" ausreichend definiert sind.

Das Ausbreitungsmodell wurde anhand der grundlegenden Rahmendaten parametrisiert. Die Darstellung der Geometrie erfolgte mit einem Berechnungsgitter mit Kantenlängen von 0,05 m, aus der eine Gesamtanzahl von 349.920 Kontrollvolumen resultiert. Die unterschiedlichen geometrischen Maße wurden dementsprechend gerundet, Abb. 6.9 gibt eine Übersicht über die geometrische Darstellung.

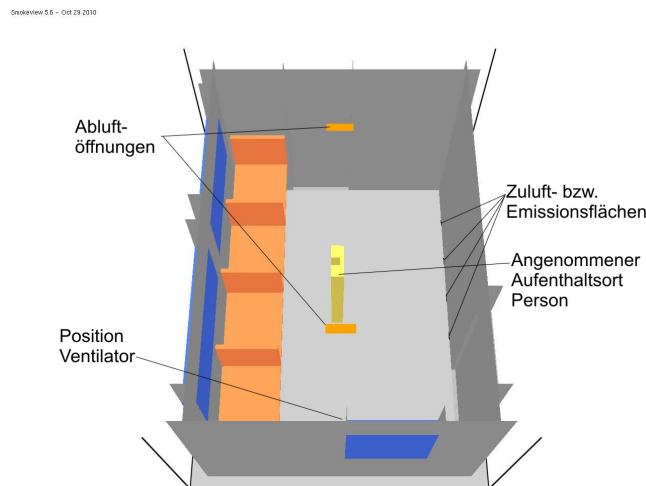


Abbildung 6.9: Berechnungsgeometrie des IPA-Expositionslabors [7]

Aus dem bekannten Raumvolumen und den verschiedenen Luftwechszahlen bestimmten sich die gesamten Zu- und Abluft-Volumenströme in $[m^3/h]$. Das Ausbreitungsmodell erfordert dagegen die Angabe des flächenspezifischen Massenstroms der Zu- bzw. Abluft in $[kg/(s m^2)]$. Gleichung 6.5¹¹⁹ legt die notwendige Umrechnung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichte der Umgebungsluft dar.

$$\dot{m}''_i = (\lambda \cdot V_R) \cdot \left(\frac{\rho_{Luft,0^\circ C} \cdot 273,15 K}{T_R} \right) \cdot \frac{1}{3600 s/h \cdot A_{aeq,ges,i}} [kg/(s m^2)] \quad (6.5)$$

Aufgrund der modellspezifischen, alleinigen Darstellungsmöglichkeit rechteckiger Geometrien sowie der Bindung an das verwendete Berechnungsgitter wurden für die Zu- und Abluftflächen äquivalente Flächen vergleichbarer Größe bzw. durch Rundung der Abmessungen gebildet, die

¹¹⁹ Parameter der Darstellung: \dot{m}''_i = flächenspezifischer Massenstrom der Zu- oder Abluft in $[kg/(s m^2)]$, λ = Luftwechszahl in $[1/h]$, V_R = Raumvolumen in $[m^3]$, $\rho_{Luft,0^\circ C}$ = Dichte Luft bei $0^\circ C$ bzw. $273,15 K$ in $[kg/m^3]$, T_R = Lufttemperatur Versuchsraum in $[K]$, $A_{aeq,ges,i}$ = äquivalente Gesamtfläche der Zu- bzw. Abluftöffnungen in $[m^2]$.

in Gleichung 6.5 eingingen. Die Quellauslässe wurden dazu rechteckig mit den einer Breite von 0,10 m und einer Höhe von 0,05 m (Einzelfläche 0,005 m², Gesamtfläche 0,055 m²) einbezogen. Bei den Abluftöffnungen erfolgte eine Rundung der Abmessungen auf 0,30 m und 0,10 m (0,03 m²), über die auch die Einschränkung der zur Verfügung stehenden Fläche durch die vorhandenen Lüftungsgitter Berücksichtigung fand.

Die Kalibrierversuche beinhalteten definierte Zielwerte der Luftkonzentrationen, die entweder zu Beginn der Betrachtungen bestanden (Abklingkurven) oder über die Untersuchungsdauer aufzubauen waren (Anlaufkurven). Die Festlegung bei den unterschiedlichen Versuchen erfolgte in [ppm], wobei die Zielwerte als entsprechender Massenstrom der Zuluftluft beigemischt wurden. Aus den Angaben waren zur Modellparametrisierung einerseits atmosphärische Massenanteile zu Beginn der Berechnungen (für Abklingkurven), andererseits die korrelierenden Massenströme des Versuchsstoffs sowie der Zuluft, die beide gleichzeitig über die Quellauslässe in den Versuchsraum eintraten, zu bestimmen.

Die Bestimmung der Massenanteile basierte auf der nachfolgend beschriebenen Berechnungssystematik¹²⁰, die auf den vorliegenden Daten und daraus ermittelbaren Größen fußt. Die für die verschiedenen Kalibrierversuche berechneten Massenanteile der Untersuchungstoffe wurden als Anfangsbedingung in das Ausbreitungsmodell eingebunden, das für den nicht definierten Massenanteil Umgebungsluft in standardisierter Zusammensetzung annimmt.

1. Bestimmung der Massenkonzentration des Versuchsstoff:

$$c_{i,t=0} = c_{i,ppm} \cdot \rho_{i,T_\infty} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (6.6)$$

2. Bestimmung der korrespondierenden Massenkonzentration der Umgebungsluft:

$$\begin{aligned} c_{Luft,ppm} &= 1.000.000 \text{ ppm} - c_{i,ppm} \text{ [ppm]} \\ c_{Luft,t=0} &= c_{Luft,ppm} \cdot \rho_{Luft,T_\infty} \text{ [kg/m}^3\text{]} \end{aligned} \quad (6.7)$$

3. Bestimmung des Massenanteils des Versuchsstoffs:

$$\begin{aligned} c_{ges,t=0} &= c_{i,t=0} + c_{Luft,t=0} \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ x_{i,t=0} &= \frac{c_{i,t=0}}{c_{ges,t=0}} \text{ [-]} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Aufbauend auf dieser Systematik ließen sich ebenfalls die flächenspezifischen Emissions-Massenströme des Versuchsstoffs sowie - ebenfalls korrelierend - der Zuluft bestimmen. Die Verknüpfung mit dem gesamten Zuluft-Massenstrom wurde für den Versuchsstoff entsprechend Gleichung 6.9¹²¹ vorgenommen, die Bestimmung des flächenspezifischen Zuluftmassenstroms erfolgte entsprechend bzw. durch Subtraktion.

$$\dot{m}''_{i,Zu} = \frac{\dot{m}_{ges,Zu} \cdot x_i}{A_{ges,Zu}} \text{ [kg/(s m}^2\text{)]} \quad (6.9)$$

¹²⁰ Parameter der Darstellung: $c_{i,t=0}$ = Massenkonzentration Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn in [mg/m³], $c_{i,ppm}$ = Zielwert Volumenkonzentration Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn in [ppm], ρ_{i,T_∞} = Dichte Versuchsstoff bei Umgebungstemperatur in [kg/m³], $c_{Luft,ppm}$ = Volumenkonzentration Luft zu Betrachtungsbeginn in [ppm], $c_{Luft,t=0}$ = Massenkonzentration Luft zu Betrachtungsbeginn in [mg/m³], ρ_{Luft,T_∞} = Dichte Luft bei Umgebungstemperatur in [kg/m³], $c_{ges,t=0}$ = gesamte Gas-Massenkonzentration zu Versuchsbeginn in [kg/m³], $x_{i,t=0}$ = Massenanteil Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn [-].

¹²¹ Parameter der Darstellung: $\dot{m}''_{i,Zu}$ = flächenspezifischer Emissions-Massenstrom des Versuchsstoffs in [kg/(s m²)], $\dot{m}_{ges,Zu}$ = gesamter Zuluft-Massenstrom in [kg/s], x_i = Massenanteil des Versuchsstoffs, bestimmt anhand Gl. 6.6 bis 6.8 [-], $A_{ges,Zu}$ = gesamte Zuluftfläche (Summe Einzelflächen der Quellauslässe entsprechend Parametrisierung des Ausbreitungsmodells) in [m²].

Die Ableitung des gesamten Zuluft-Massenstroms erfolgte aus dem Volumenstrom sowie vereinfachend der Luftdichte bei Umgebungstemperatur. Diese Vereinfachung beruht auf den niedrigen Volumenkonzentrationen des Versuchsstoffs, die lediglich zu geringen Dichteänderungen führen würde. Die Parametrisierung des Ausbreitungsmodells berücksichtigte die ermittelten Massenströme für jeden Quellauslass unter Beachtung der zeitabhängigen Zu- oder Abschaltung. Erfolgte keine Freisetzung (z.B. nach Abschaltung der Emission bei Abklingkurven), wurde der Massenanteil des Versuchsstoffs durch Luft ergänzt, so dass die Zuluft konstant aufrecht erhalten wurde.

Die Ausbreitungsberechnungen wurden mehrfach - mit Variationen verschiedener Parameter - für die Kalibrierversuche durchgeführt. Neben der Berechnung der tatsächlichen Versuchsbedingungen bezogen diese Sensitivitätsbetrachtungen

- die Ein- bzw. Abschaltung des Ventilators,
- die Veränderung von Raumtemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (jeweils ein Berechnungsszenario),
- den Aufenthalt einer mittig im Versuchsraum angeordneten Person über die gesamte Berechnungsdauer hinweg sowie
- die teilweise Kombination dieser Veränderungen

ein. Durch die ggf. unterschiedlichen Ziel- bzw. Ausgangskonzentrationen bei gleichem Versuchsstoff erfolgte die Bildung weiterer Berechnungsszenarien, die jedoch keine unmittelbaren Sensitivitätsuntersuchungen darstellen. Die Annahmen für die nicht dokumentierten thermodynamischen Parameter beliefen sich - mit Ausnahme gezielter Sensitivitätsbetrachtungen - für die Lufttemperatur auf 22°C , den Luftdruck auf $1013,25\text{ hPa}$ sowie die relative Luftfeuchte auf 40% . Die verschiedenen Berechnungsszenarien sind tabellarisch in Anhang G.2.2¹²² zusammengefasst und den verschiedenen Datensätzen zugeordnet. Aus dieser Aufstellung gehen gleichermaßen die modellbedingten Anpassungen von Rahmenbedingungen (z.B. Bildung rechteckiger Äquivalenzflächen der Quellauslässe) hervor.

Im Zuge der Auswertungen wurde festgestellt, dass bei der Bestimmung von Massenanteilen von Ethylacetat und n-Butanol anstelle der Dampfdichten die Dichten des flüssigen Aggregatzustands verwendet wurden. Entsprechend Gl. 6.6 bis 6.9 geht die Stoffdichte des Gaszustands über den Anfangszustand und die Emissions-Konzentration bzw. die Zusammensetzung der Zuluft indirekt als Eingangsparameter in die Ausbreitungsberechnungen ein. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse nimmt zur Einheitenkonvention ebenfalls Bezug auf die Gasdichte (vgl. Kap. 5.5, Gleichung 5.8). Die gasförmige Stoffdichte ist mathematisch für Parametrisierung und Auswertung ein konstanter Faktor.

In der Ausbreitungsberechnung stellt die Stoffdichte einen wichtigen Parameter, u.a. zur Bestimmung des Auftriebsverhaltens des Stoffs, dar. Das Ausbreitungsmodell verwendet allerdings den stoffspezifischen und nicht vom Aggregatzustand abhängigen Parameter der molaren Masse, aus dem die Gasdichte zurückberechnet wird. Diese Größe wurde korrekt parametrisiert, so dass das Ausbreitungsverhalten innerhalb der Berechnungen nicht beeinflusst wurde.

Die Verwendung der Flüssigkeits- statt der Dampfdichten stellt ausschließlich einen Faktor dar, der sich bei Eingabe und Auswertung nur auf die Anpassung von Einheiten auswirkt und sich durch die doppelte Verwendung aufhebt. Im Ausbreitungsmodell fand auf diese Weise ein geringfügig veränderter Massenanteil Berücksichtigung, das Strömungsverhalten wurde jedoch

¹²² Die Berechnungen verwendeten alternative Bezeichnungen für die Kalibrierversuche, die sich aus dem Stoffnamen sowie der weiteren Szenariogestaltung generieren. Zur Übersichtlichkeit stellt die Tabelle die Bezüge zwischen diesen Benennungen her.

nicht beeinflusst. Die Berücksichtigung der Flüssigkeitsdichte hat an dieser Stelle somit keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Die tabellarische Übersicht gibt die irrtümlich verwendeten Werte an.

Die Ursprungsdaten der Kalibrierversuche umfassen teilweise große Zeitspannen, in denen Stoffkonzentrationen im stationären Zustand verbleiben (z.B. zu Versuchsbeginn). Für die Berechnungen und Vergleiche sind jedoch die instationären Bedingungen in den Anlauf- bzw. Abklingphasen relevant. Die Dokumentationen der Versuchsdaten umfassen weiterhin keine Angabe zu genauen Ein- bzw. Abschaltzeitpunkten der Stoffemissionen. Der Einschaltzeitpunkt des Ventilators im Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter" ist ebenfalls nur ungefähr als zeitgleich zur wiedereinsetzenden Stoffemission bekannt.

Die Berechnungen vernachlässigen daher in weiten Teilen die Zeitdauern mit stationären Bedingungen und konzentrieren sich auf die Ermittlung zeitabhängiger Konzentrationen im instationären Zustand, um u.a. die Berechnungsdauern zu verkürzen. Da die genauen Zeitpunkte der Zustandswechsel von Emission und Ventilator nur in den Parametrisierungen der Berechnungen genau bekannt sind, muss in den Referenzdaten dieser Zeitpunkt als Bezug festgelegt werden. Von diesem Zeitpunkt ausgehend können die berechneten mit den gemessenen instationären Konzentrationsverläufen verglichen werden. Der möglichst genaue Abgleich dieses Zeitpunkts bereitet die Auswertung vor und berücksichtigt die folgende Systematik:

1. Bezug auf die in der Parametrisierung jeweils definierten Zeitpunkte des Zustandswechsels von Stofffreisetzung (Ende oder Beginn) oder Ventilatoreinsatz (Einschaltung),
2. Ermittlung des entsprechenden Zeitpunkts in den Ursprungsdaten auf Grundlage von Erfahrungen aus [98] sowie den Zeitpunkten erster (geringer) Reaktionen und signifikanter Veränderungen der gemessenen Luftkonzentrationen,
3. Abstimmung dieser Zeitpunkte zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen als Ausgangspunkt der Ergebnisvergleiche.

Die einheitliche Abstimmung der Mess- und Berechnungsergebnisse auf einen Bezugs-Zeitpunkt ermöglicht ebenfalls in den Referenzdaten die Identifizierung der in den Berechnungen vernachlässigten Zeitspannen mit stationären Bedingungen. Die in den Vergleichen betrachteten Referenzwerte beschränken sich somit auf die in den Berechnungen verwendeten Zeitdauern. Da diese Verkürzung von in die Vergleiche einbezogenen Messdaten ausschließlich für stationäre Konzentrationsbedingungen Verwendung findet, ergeben sich keine unzulässigen Verfälschungen der Untersuchungen bzw. Datenmanipulationen. Ggf. resultierende Ungenauigkeiten der Zeitabstimmung liegen im (Milli-) Sekundenbereich, die in praktischen Messungen ebenfalls z.B. durch Trägheit der Messgeräte auftreten. Die Bewertung bezieht auch die qualitativen Konzentrationsverläufe und, über die statistischen Kennwerte, Faktoren möglicher Verschiebungen ein, so dass Abweichungen durch Anwendung der Systematik identifiziert und berücksichtigt werden.

6.2.2.5 Auswertung der Vergleiche

Die Versuchsdaten des Expositionslabors weisen Stoffkonzentrationen in der Einheit [ppm] aus, die Ergebnisse des Ausbreitungsmodells basieren dagegen auf der Einheit [kg/m³]. Die Anwendung von Gleichung 5.8 aus Kap. 5.5 bezweckt die Umrechnung der Berechnungsergebnisse, in die erneut die temperaturabhängige Dichte der Umgebungsluft eingeht.

Die qualitativen Gegenüberstellungen der Konzentrationsverläufe sowie die entsprechenden statistischen Kennwerte sind für die verschiedenen Versuchs- bzw. Berechnungsszenarien in Anhang H.2 aufgeführt. Die Darstellungen beruhen auf den in Kap. 6.2.2.4 erläuterten zeitlichen

Abstimmungen. Während die direkten Vergleiche zwischen Versuchsbedingungen und den jeweils entsprechenden Berechnungsszenarien allgemeine Aussagen erbringen, erfordert die Auswertung der Sensitivitätsanalysen die Untergliederung nach Abklingkurven, Anlaufkurven oder deren Kombination. Die Notwendigkeit basiert auf den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der Konzentrationserfassung, die zu unterschiedlichen, aber in Gesamtheit korrespondierenden Ergebnissen führen. In diesen Untersuchungen stellen die statistischen Kennwerte eine gute methodische Hilfestellung bei der Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener Betrachtungsfälle dar, da die geringen Schwankungen der Luftkonzentrationen bzw. die glatten Konzentrationsverläufe lediglich geringe Verfälschungen der Werte verursachen.

6.2.2.5.1 Beschreibung

Die Vergleiche der Kalibrierversuche mit den Berechnungen unter Verwendung gleicher Rahmenbedingungen zeigen allesamt gute qualitative und quantitative Übereinstimmungen. Qualitativ weisen die Mess- und Berechnungsergebnisse nahezu gleichförmige zeitabhängige Verläufe auf. Unter Berücksichtigung der in Kap. 6.2.2.4 erläuterten Systematik zur Bestimmung des Ausgangszeitpunkts der Konzentrationsvergleiche bzw. der Zustandswechsel tendieren die berechneten Konzentrationsverläufe zur Überdeckung mit den in den Kalibrierversuchen gemessenen Werten, wobei lediglich geringe Abweichungen auftreten. Die berechneten Konzentrationsverläufe weisen nur geringe Schwankungen auf und bilden gleichmäßige Verläufe ab (vgl. Visualisierungen in Anhang H.2.2).

Die zugehörigen statistischen Kennwerte bestätigen die qualitativ abgeschätzten Übereinstimmungen: Die relativen Abweichungen nehmen Werte zwischen 0,037 (nahezu Übereinstimmung, Abklingkurven Ethylacetat bzw. Propylen) und 0,176 (kombinierte Abkling- und Anlaufkurven für Propylen) an. Ergänzend weisen die Werte der inneren Produkte sowie der Projektionskoeffizienten, die nahe des Idealzustands liegen, auf lediglich zufällige Abweichungen bei Verschiebungen um konstante Faktoren hin.

Für die Sensitivitätsszenarien (vgl. Anhang H.2.3), bei denen der Ventilator in den Berechnungen ohne Berücksichtigung blieb, zeigen die Konzentrationsvergleiche bei Abklingkurven die Tendenz auf, dass die Messwerte (mit Ventilator ermittelt) durch die Berechnungsergebnisse unterschätzt werden. Dementsprechend fallen die ermittelten relativen Abweichungen mit Werten zwischen 0,176 und 0,248 im Vergleich höher aus, die absoluten Konzentrationsdifferenzen sind jedoch gering. Qualitativ behalten die berechneten Verläufe ihre charakteristische Gestalt bzw. die stetigen Entwicklungen, ggf. mit erhöhten Schwankungen, bei. Die Kennwerte des inneren Produkts und des Projektionskoeffizienten belegen dieses Verhalten, obwohl ebenfalls erhöhte Abweichungen von den Idealwerten eintreten.

Die untersuchte Anfahrkurve des Versuchs "Ethylacetat-Expolab 5" neigt dagegen zur geringfügigen Überschätzung bei einer relativen Abweichung von 0,110. Das qualitative und quantitative Verhalten der Bewertungsaspekte entspricht im Übrigen den Charakteristiken der Abklingkurven. Die Berechnungsergebnisse der aufeinanderfolgenden Abkling- und Anfahrkurven (Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter") werden von den Abweichungen lediglich im Bereich des zwischenzeitlich eingeleiteten Konzentrationsaufbaus und dem entsprechenden charakteristischen Verhalten beeinflusst, da der Ventilator im Rahmen der Versuchsdurchführung ebenfalls nur während der Anlaufphase betrieben wurde.

Die Berücksichtigung des Personenaufenthalts bei gleichzeitig betriebem Ventilator zeigt im Vergleich mit den Messergebnissen sowohl für Ab- als auch für Anlaufkurven ein mit lediglich geringen Abweichungen auftretendes, vergleichbares Verhalten zu den Berechnungsszenarien ohne Personenaufenthalt. Sofern Abweichungen von den Messergebnissen auftreten, streben die berechneten Konzentrationsverläufe eine geringfügige Unterschätzung an. Insofern bleiben die

charakteristischen qualitativen Verläufe mit geringen Schwankungen bestehen, die statistischen Kennwerte deuten ggf. sogar eine Verbesserung der Überdeckung von Mess- und Berechnungsergebnissen sowie konstante Verschiebungen an.

Das Sensitivitätsszenario der kombinierten Abkling- und Anfahrkurve weist bei Berücksichtigung von Personenaufenthalt und Ventilator (Betrieb während der Abklingphase) ebenfalls die Beibehaltung des charakteristischen und experimentell belegten Konzentrationsverlaufs auf. Die statistischen Kennwerte deuten dagegen auf die Erhöhung der Übereinstimmung zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen hin. Im Vergleich zur Berechnung unter Verwendung der Versuchsbedingungen verringert sich die relative Differenz auf 0,135 (zuvor 0,176). Das innere Produkt und der Projektionskoeffizient liegen im Nahbereich der Idealwerte.

Die Sensitivitätsanalyse mit Verzicht auf den Ventilator bei gleichzeitigem Personenaufenthalt basiert auf dem Versuch "Abklingen-Propylen". Der Vergleich ergibt die Unterschätzung gemessener Stoffkonzentrationen unter Beibehaltung der qualitativen Konzentrationsabnahme bei erhöhten Schwankungen. Im Vergleich zu den übrigen diesem Versuch zuzuordnenden Berechnungsszenarien ergibt sich mit einem Wert von 0,244 die deutlich höchste relative Differenz. Sowohl inneres Produkt als auch Projektionskoeffizient verbleiben im Bereich, der allgemein in den vorliegenden Untersuchungen vorgefunden wird.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung mit Veränderung der Raumtemperatur behalten weiterhin eine gute Überdeckung mit gemessenen Konzentrationen bei Aufrechterhaltung des qualitativ gleichen Konzentrationsverlaufs bei. Im Vergleich mit der zugehörigen Berechnung, welche auf den Versuchsbedingungen beruht, tritt eine geringfügige Unterschätzung ein. Dementsprechend nimmt die relative Abweichung geringfügig zu. Das innere Produkt und der Projektionskoeffizient nehmen ebenfalls leicht ab bzw. zu.

Bei Veränderung der Luftfeuchtigkeit als Sensitivitätsbetrachtung bleiben die Berechnungsergebnisse in Relation zum ursprünglichen Berechnungsszenario (und damit zu den Messwerten) auf gleichem Niveau. Qualitative und quantitative, sich in den Kennwerten ausdrückende Abweichungen sind kaum feststellbar und zu vernachlässigen.

6.2.2.5.2 Diskussion und Interpretation

Allgemein zeigen alle Vergleiche - sowohl bei Verwendung der Versuchsbedingungen als auch bei Sensitivitätsuntersuchungen - die charakteristischen Konzentrationsverläufe, die im Zuge der Kalibrierversuche am Messplatz 3 des Versuchsraums ermittelt wurden. Insbesondere die Berechnungsszenarien mit gleichen Rahmenbedingungen weisen außerordentliche Übereinstimmungen auf, die sich einerseits über verschiedene Versuchsstoffe, andererseits auch über Konzentrationsbereiche in Größenordnungen zwischen ca. 0,5 ppm und etwa 565 ppm erstrecken. Die ebenfalls grundsätzlich festgestellten Verschiebungen der Konzentrationsverläufe um konstante Faktoren (Aussage des Kennwerts des inneren Produkts) begründen sich in der erforderlichen zeitbezogenen Abstimmung (vgl. Kap. 6.2.2.4), die lediglich ein methodisches Hilfsmittel darstellt und ggf. nicht unmittelbar genau erfolgen konnte.

Die dem Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter" (kombinierte Abkling- und Anlaufkurve) zugehörigen Vergleiche weisen in Relation zu anderen Kalibrierversuchen hohe relative Abweichungen auf. Dies beruht auf der Parametrisierung der Berechnungen, die einen Abfall von der Ausgangskonzentration sowie einen anschließenden Konzentrationsaufbau auf den gleichen Wert vorsieht. In den Kalibrierversuchen wurde dagegen im Zuge des Konzentrationsaufbaus ein geringerer Zielwert angestrebt, so dass die erwartungsgemäße Differenz durch Überschätzung den Kennwert verfälscht. Die inneren Produkte und Projektionskoeffizienten belegen jedoch,

dass die Darstellungen die qualitativen Verläufe korrekt wiedergeben und bei einer entsprechend angepassten Parametrisierung mit einer verbesserten Übereinstimmung gerechnet werden kann. Ebenfalls geringfügige Verfälschungen weisen die statistischen Kennwerte für den Versuch "Ethylacetat-Expolab 5" (Anfahrkurve) auf, da während der Messungen zu Kontrollzwecken Referenzkonzentrationen auf die Messgeräte geschaltet wurden (Schwankungen der Messwerte [98]). Aus der qualitativen Übereinstimmung der Konzentrationsverläufe und den Überschneidungen vor bzw. nach diesen Kontrollmessungen bleibt jedoch die Ergebnisübereinstimmung ersichtlich.

Generell belegen die Untersuchungsergebnisse die Validität des Ausbreitungsmodells FDS für die Berechnung von Luftkonzentrationen im Rahmen von Arbeitsschutz-Betrachtungen. Die Berechnungsmöglichkeit erscheint sich unabhängig vom Stoff über einen großen Konzentrationsbereich zu erstrecken. Aus den Versuchsbedingungen sowie den Stoffeigenschaften sind jedoch die Voraussetzungen bzw. Begrenzungen der

- bekannten Emissionsbedingungen gasförmiger Stoffe,
- Verwendung von Emissionsflächen mit geringen Äquivalenzverhältnissen, die größer als das verwendete Berechnungsgitter sind,
- hohen Luftwechselzahlen bzw. Volumenströme der Zu- und Abluft sowie
- resultierenden Strömungsbedingungen bzw. -richtungen (Ausrichtung der Luftführung vom Boden zur Decke)

zu beachten. Weiterhin wird auf die idealisierten Rahmenbedingungen sowie den möglichen Einfluss des Personenaufenthalts, der in den Kalibrierversuchen nicht kontrolliert stattfand und den nachfolgend die Sensitivitätsuntersuchungen diskutieren, hingewiesen.

Die Relation mit Vergleichsergebnissen, die auf Berechnungen ohne Verwendung des Ventilators beruhen, verdeutlicht dessen Einfluss auf die Konzentrationsbedingungen: Die Unterschätzung der gemessenen Abklingkurven deutet auf eine beschleunigte Konzentrationsabnahme an der analysierten Messstelle hin. Demgegenüber folgt aus der Überschätzung der Messwerte für die berechnete Anlaufkurve ein beschleunigter Konzentrationsaufbau ohne Ventilator. Aus diesen Verhaltensweisen ergibt sich unter Berücksichtigung der Lage der Zuluft- und Abluftflächen, die durch den hohen Luftaustausch des Raumes eine deckengerichtete Luftströmung hervorrufen, sowie der Stofffreisetzung der korrespondierende Schluss, dass ohne Ventilator eine gezieltere Luftführung eintritt. Im Umkehrschluss erzwingt der Ventilatoreinsatz Verwirbelungen vorliegender Raumströmungen, in deren Folge sich die Effektivität des Stoffabtransports verringert. Die Begutachtung qualitativer, dreidimensionaler Visualisierungen (vgl. Abb. 6.10) der Stoffkonzentrationen über den Versuchsraum hinweg bestätigt diesen Schluss, wobei sich die Luftkonzentrationen über den Raum hinweg mit Ventilatorverwendung als örtlich homogener darstellen. Ohne Ventilator erfolgt ein horizontal geschichteter Konzentrationsauf- bzw. -abbau, der zusätzlich den Einfluss der Abluftführung erkennen lässt. Dieser Effekt ist strömungsmechanisch plausibel und nachvollziehbar.

Die Sensitivitätsbetrachtungen zum Ventilatorverzicht bzw. -einsatz unterstreichen die Relevanz der Erfassung und Wiedergabe der Lüftungsbedingungen, aber auch sonstiger Einflussbedingungen auf Luftströmungen bei der Verwendung des Ausbreitungsmodells. Abluftöffnungen an Betriebsmitteln stellen bspw. derartige Einflüsse dar. Die Ergebnisse belegen, dass aus der Vernachlässigung dieser Einflussfaktoren Abweichungen zwischen tatsächlichen Verhältnissen und Berechnungsergebnissen resultieren können. Die entstehende Überschätzung von Konzentrationsverläufen im Falle der Anlaufkurve deutet darauf hin, dass die Abweichungen dabei möglicherweise auf der kritischeren, für Arbeitsschutz-Betrachtungen "sicheren" Seite liegen. Da es

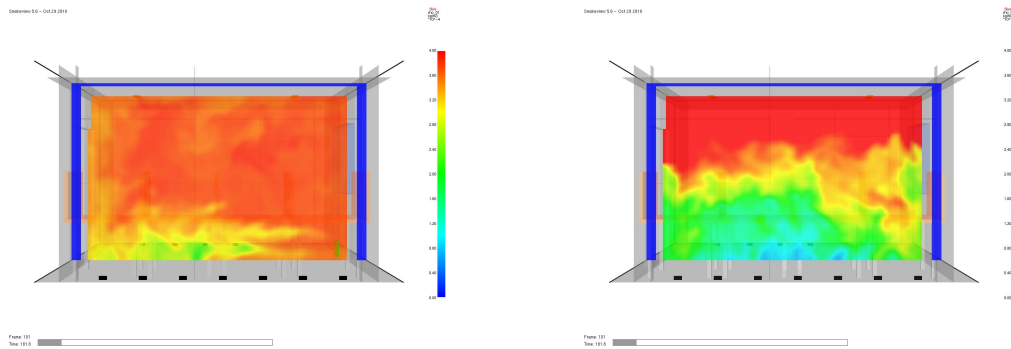


Abbildung 6.10: Qualitativer Vergleich zur Homogenität orsbezogener Konzentrationen; links: mit Ventilator, rechts: ohne Ventilator; ($t=100s$, Schnittebene: Ventilatormittelachse $y = 1,40m$) [7]

sich um eine Einzelfallbetrachtung im idealisierten Umfeld und bei einem hohen Luftaustausch handelt, besteht jedoch keine Verallgemeinerbarkeit dieser Aussage. Weitergehende Betrachtungen und Analysen können die Klärung dieses Einflussfaktors, insbesondere bei geringeren allgemeinen Lüftungsbedingungen, verfolgen, der hier nicht weiter differenziert wird.

Die Analysen zu Sensitivitätsbetrachtungen mit Berücksichtigung des Personenaufenthalts - mit und ohne Verwendung des Ventilators - verdeutlichen die Relevanz der Erfassung anwesender Personen auf die Konzentrationsbedingungen: Wie zuvor erläutert, führt die Verwendung des Ventilators zu Turbulenzen und Auflösung grundlegender Luftströmungen, so dass sich ein Versuchsstoff gleichmäßiger verteilt. Berechnungen unter Berücksichtigung von Personenaufenthalt und Ventilatorverwendung erzielen ähnliche Vergleichsergebnisse wie Berechnungen ohne Person. Die geringe Tendenz zur Unterschätzung der Messwerte weist auf einen beschleunigten Stofftransport vom Messpunkt weg bzw. Richtung Decke und von da aus dem Versuchsraum hin. Diese Beschleunigung tritt aufgrund der wärmebedingten Auftriebsströmung im Umfeld der Person ein, wird jedoch entsprechend dem charakteristischen Verhalten zu großen Anteilen durch die Ventilatorströmung überdeckt. Entfällt der Ventilatoreinsatz, erhöht sich diese Beschleunigung zusätzlich, da keine Störung auf die Auftriebsströmung einwirkt.

Die Verbesserung der Kennwerte für die Ventilator- und Personen-Berechnung im Falle der kombinierten Abkling- und Anlaufkurve legt die Interpretation nahe, dass ggf. während der Versuche ein nicht dokumentierter Personenaufenthalt stattfand. Da dieses Szenario auf einer sehr geringen Ausgangs- bzw. Zielkonzentration beruht, haben kleine Veränderungen der Rahmenbedingungen im Vergleich zu anderen Versuchen ggf. größere Auswirkungen auf die resultierenden Konzentrationsbedingungen, die der allgemein hohe Luftwechsel des Versuchsraums nicht überdeckt.

Aus den Relationen der Sensitivitätsanalysen wird geschlossen, dass die Darstellung des Personenaufenthalts erwartungsgemäß einen wesentlichen Einflussfaktor auf die Strömungsbedingungen eines Arbeitsraums darstellt, der für die praktische Anwendung des Ausbreitungsmodells, vor allem für Betrachtungen des Arbeitsschutzes mit Ausrichtung auf Stoffkonzentrationen im Atembereich, zu berücksichtigen ist. Der Aufbau des Versuchsraums beinhaltet, dass die generelle Luftführung vom Boden zur Decke erfolgt. Bei anderen Anordnungen der Zu- und Abluftöffnungen und daraufhin veränderten Strömungsbedingungen darf jedoch auf Grundlage des vorliegenden Einzelfalls nicht davon ausgegangen werden, dass durch den Personenaufenthalt eine Verringerung des generellen Konzentrationsniveaus eintritt.

Die Vergleichsrechnung bei veränderter Umgebungstemperatur zeigt durch die Abweichungen, dass sich die Temperaturabschätzung durchaus auf die Ergebnisse auswirkt. Unter Berücksichtigung des hohen Luftaustauschs des Versuchsraums und der Verwirbelung des Ventilators sind

die Auswirkungen zwar gering, geben jedoch die Relevanz wieder. Bei niedrigeren Lüftungsvolumenströmen bzw. Geschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass sich entstehende Dichteunterschiede zwischen Versuchsstoff und Umgebungsluft stärker auswirken. In Verbindung mit dem wärmebedingten Effekt des Personenaufenthalts, der für Betrachtungen des Arbeitsschutzes relevant ist, muss die Abschätzung bzw. Festlegung von Umgebungstemperaturen genau erfolgen. Liegen bei der praktischen Verwendung des Berechnungsmodells keine eindeutigen Temperaturbedingungen vor, kann diesem Informationsmangel bspw. mit mehrfachen Berechnungen als Parameterstudie begegnet werden.

Die kaum feststellbare Abweichung bei der Berechnung mit veränderter relativer Luftfeuchtigkeit deutet darauf hin, dass dieser Parameter für die Realitätstreue der Berechnungsergebnisse eine untergeordnete Bedeutung aufweist. Liegen bei einem praktischen Einsatz keine genauen Werte für diesen Parameter vor, kann daher auf Vergleichsrechnungen verzichtet werden. Die pauschale Abschätzung des Parameters mit einem Wert von 40 % (voreingestellter Wert im Ausbreitungsmodell FDS) erscheint daher sinnvoll.

Die Ausbreitungsberechnungen beruhen auf der Datenerfassung mit Hilfe des im Zuge der Konzeption der WEA entsprechend konkretisierten Arbeitssystem-Modells. Die Detaillierung umfasst die notwendigen Parameter und stellt diese in geeigneter Weise zur Weiterverwendung zur Verfügung, was die Anwendbarkeit und Schnittstellenkompatibilität bestätigt.

6.2.2.6 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der anhand der Versuchsdaten des IPA-Expositionslabors durchgeführten Analysen unterstreichen und ergänzen die bereits in [95] und Kap. 6.2.1 gewonnenen Erkenntnisse zur Validität des Ausbreitungsmodells. Zusammenfassend ergeben sich folgende Aussagen:

1. Das Berechnungsmodell FDS ist für die Ermittlung der Ausbreitung von Gasen valide und gibt experimentelle Referenzwerte bei entsprechender Parametrisierung detailliert wieder. Bei Verwendung genau bekannter Parameter treten lediglich geringe Abweichungen auf, die eine Wiedergabe und Analyse von plausiblen Strömungsvorgängen zulassen.
2. Der Validierungsnachweis bezieht unterschiedliche Stoffe und Ausgangs- bzw. Zielkonzentrationen ein, eine generelle Verwendbarkeit scheint mit Verweis auf verschiedene Anwendungsbedingungen gegeben.
3. Die ermittelten Ergebnisse und Übereinstimmungen basieren auf Referenzen unter idealisierten und bekannten Bedingungen. Gleichzeitig muss der hohe Luftaustausch sowie die gezielte Luftführung vom Boden in Richtung Decke berücksichtigt werden.
4. Als relevante Einflussfaktoren auf die Stoffausbreitung und die berechneten Konzentrationsverläufe identifizieren die Sensitivitätsstudien die Lüftungsbedingungen des Raumes, den Personenaufenthalt, zusätzliche Strömungseinflüsse sowie die Raumtemperatur. Der Parameter der relativen Luftfeuchtigkeit ist dagegen von untergeordneter Bedeutung.
5. Die Erfassung der erforderlichen Eingangsparameter der Ausbreitungsberechnung erfolgt vollständig mit dem konkretisierten Arbeitssystem-Modell, das über entsprechende Schnittstellen verfügt. Bei der Verwendung der Stoffdichte als Umrechnungsfaktor muss beachtet werden, dass sich die Dichte auf den gasförmigen Aggregatzustand bezieht. Die Ausbreitungsberechnung ermittelt die relevante Stoffdichte aus dem Eingangswert des Molekulargewichts.

Aus diesen Erkenntnissen sowie den zugrunde liegenden Untersuchungsergebnissen leiten sich für den praktischen Einsatz verschiedene Bedingungen und Anwendungsgrenzen ab. Die Erkenntnisse dieses Abschnitts der Validierung der WEA bzw. an dieser Stelle des Moduls zur Erfassung der Stoffausbreitung ergeben folgende Schlussfolgerungen für die praktische Anwendung:

1. Die Berechnungen betrachten die Gasausbreitung. Die Umgebungstemperatur liegt im Bereich "normaler" Arbeitsbedingungen¹²³.
2. Der Emissions-Massenstrom bzw. korrespondierende Größen von gasförmigen Freisetzungen sind bekannt bzw. genau abschätzbar.
3. Die Wiedergabe der Emissionsfläche erfordert keine bzw. lediglich eine geringe Bildung von Äquivalenzverhältnissen.
4. Die Lüftungsbedingungen werden möglichst genau abgeschätzt und in die Ausbreitungsrechnungen übernommen. Dazu zählen neben Zu- und Abluft auch weitere strömungsbeeinflussende Faktoren, wie z.B. die Abluftführung von Maschinen.
5. Bei hohen Luftwechsellinien bzw. Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des Raums können genauere Ergebnisse für Stoffkonzentrationen erwartet werden. Sind die Lüftungsbedingungen dagegen unklar, müssen niedrige Volumenströme mit Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden. Die Auswertung der Berechnungen berücksichtigt mögliche Unsicherheiten.
6. Der Personenaufenthalt ist definiert und wird in den Berechnungen berücksichtigt, da die Wärmefreisetzung ebenfalls die Strömungsbedingungen beeinflusst. Dies gilt gleichfalls für andere Wärmequellen innerhalb des Raumes, z.B. heiße Oberflächen.
7. Wenn möglich, erfasst die Informationsermittlung die vorherrschenden Raumtemperaturen genau. Andernfalls erfordert die Abschätzung der im Sinne des Arbeitsschutzes ungünstigsten Konzentrationsbedingungen eine mehrfache Berechnung bei Variation der Temperaturen (z.B. als "Sommer-" und "Winterfall"). Die explizite Ermittlung der Luftfeuchtigkeit ist nicht notwendig, es wird ohne gesonderten Nachweis der voreingestellte Wert von 40 % relativer Luftfeuchte verwendet.

6.2.3 Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten

Eine universitäre Abschlussarbeit im M.Sc.-Studiengang "Brandschutz" an der Bergischen Universität Wuppertal zielte auf die Abschätzung von Gefährdungen durch die Freisetzung und Ausbreitung von CO bzw. deren Minimierung durch die Anordnung von entsprechenden Warnmeldern in Privathaushalten ab. Die Untersuchungen basierten auf einem umfassenden praktischen Versuchsteil, in dessen Rahmen in einem Versuchsraum die gezielte Freisetzung von CO erfolgte und Messungen anhand eines eigens errichteten Messgitters (Verteilung von Detektoren an definierten Messpunkten im Raum) stattfanden. Die vollständigen Untersuchungen und Ergebnisse sind in [99]¹²⁴ dargelegt und weisen durch die thematische Ausrichtung eine andere Zielsetzung als die vorliegenden Untersuchungen auf. Aufgrund der dokumentierten Rahmenbedingungen und der Betrachtung von Ausbreitungsverhalten und zeitabhängigem Aufbau von

¹²³ Die Einschränkung basiert auf der grundsätzlichen Aufstellung des Verfahrens. Erhöhte Lufttemperaturen sind dem Bereich brandähnlicher Verhältnisse zugeordnet, für die an anderer Stelle detaillierte Validierungsuntersuchungen des Ausbreitungsmodells bestehen (vgl. [67]).

¹²⁴ Die Verwendung der Versuchsergebnisse im Rahmen der vorliegenden Arbeit basiert auf der Zustimmung des Verfassers der Abschlussarbeit. Urheberrechte der Versuche und Referenzwerte verbleiben bei diesem.

CO-Luftkonzentrationen, die im Rahmen der praktischen Versuche stattfanden, ziehen die Validierungsuntersuchungen diese Versuchsdaten heran.

6.2.3.1 Rahmenbedingungen und Versuchsaufbau

Die hier aufgeführten Darstellungen nehmen auf die Erläuterungen in [99] Bezug und geben diese inhaltlich wieder. Weiterhin binden die Erörterungen zusätzliche Informationen aus der Korrespondenz mit dem Verfasser der Abschlussarbeit unmittelbar ein.

Die Versuche zur CO-Ausbreitung bzw. zum Auslöseverhalten von Warnmeldern fanden in einem eigens dazu ausgestatteten Versuchsraum statt. Der Versuchsraum verfügte über folgende Rahmen- und während der Versuche vorherrschende Umgebungsbedingungen:

- rechteckiger Grundriss mit einer Grundfläche von $18,84 \text{ m}^2$ (Länge $4,36 \text{ m}$, Breite $4,32 \text{ m}$) bei einer Höhe von $2,63 \text{ m}$ (Raumvolumen $49,54 \text{ m}^3$),
- bei Versuchsdurchführung alle Öffnungen zur Umgebung (Tür, 2 Fenster sowie ein Wanddurchbruch) verschlossen, somit kein Luftaustausch mit der Umgebung¹²⁵,
- kein Personenaufenthalt während der Versuchsdurchführung,
- Umgebungs- bzw. Lufttemperatur während der Versuchsdurchführung von ca. $17,4^\circ\text{C}$, Luftdruck von etwa $1008,0 \text{ hPa}$, keine messtechnische Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit.

Es fanden zwei unterschiedliche Emissionsszenarien statt: Einerseits umfassten die Untersuchungen einen "heißen" Betrachtungsfall, der die CO-Freisetzung infolge einer unvollständigen Verbrennung (z.B. missbräuchliche Anwendung von Grills in Räumen) symbolisierte. Dieser bleibt im Rahmen der Validierung aufgrund der Wärmefreisetzung unberücksichtigt. Andererseits erfolgte die CO-Emission als "kaltes" Versuchsszenario (z.B. Defekt an Gas-Thermen) durch die chemische Reaktion von Ameisensäure und Schwefelsäure, das in die Validierungsuntersuchungen eingeht. Der Freisetzungsort befand sich in einer Ecke des Raums (Wandabstand jeweils $0,36 \text{ m}$) auf einer Höhe von $1,04 \text{ m}$ und hatte eine Kreisfläche von $0,061 \text{ m}^2$. Aufgrund der chemischen Umsetzung war die tatsächliche Stofffreisetzung durch die fragliche Vollständigkeit der Reaktion lediglich näherungsweise ableitbar.

Die Versuche umfassten eine Versuchsdauer von jeweils 30 min und wurden insgesamt vierfach unter identischen Bedingungen durchgeführt. Aufgrund der Einsatzmengen der beteiligten Reaktanden betrug die maximal umgesetzte und als Gas freigesetzte CO-Masse $74,2 \text{ g}$, wobei der Verfasser der Abschlussarbeit eine Reaktionseffektivität von ca. 50% annahm.

Die Anordnung von Messgeräten ("X-am 7000" und "X-am 5000," Fa. Dräger Safety AG & Co. KGaA; "GasBadge Pro", Fa. Leopold Siegrist GmbH) in drei übereinander liegenden Ebenen an verschiedenen Stellen des Versuchsraums bildete ein in allen Versuchsdurchgängen beibehaltenes, dreidimensionales Messgitter zur Dokumentation der auftretenden Luftkonzentrationen. Eine weitere Messung erfolgte unter der Raumdecke, so dass die Auswertung der Versuche neben den Punktwerten die Ermittlung höhenabhängiger Profile zur Homogenität der Luftkonzentrationen über den Raum ermöglichte. Die Zeitabstände der Einzelmessungen an jedem Messpunkt

¹²⁵ Zu Versuchsbeginn erfolgte die Veranlassung der emittierenden Reaktion durch eine Person, die im Anschluss den Versuchsraum unmittelbar verließ. Sowohl Personenaufenthalt als auch Luftaustausch über die Tür wurden daher in den Berechnungen vernachlässigt.

betrugen 10 s, aus denen sich ortsabhängige Konzentrationsverläufe ergeben. Tab. 6.5 fasst die räumlichen Positionen der Messpunkte¹²⁶ zusammen.

Ebene 1	12D	13D	16D	14D	15D	9L	3L	6L
x [m]	1,08	1,08	1,08	2,16	2,16	2,16	3,24	3,24
y [m]	1,08	2,16	3,24	1,08	2,16	3,24	2,16	3,24
z [m]	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
Ebene 2	6D	8D	10D	2D	4D	8L	2L	5L
x [m]	1,08	1,08	1,08	2,16	2,16	2,16	3,24	3,24
y [m]	1,08	2,16	3,24	1,08	2,16	3,24	2,16	3,24
z [m]	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Ebene 3	5D	7D	9D	1D	3D	7L	1L	4L
x [m]	1,08	1,08	1,08	2,16	2,16	2,16	3,24	3,24
y [m]	1,08	2,16	3,24	1,08	2,16	3,24	2,16	3,24
z [m]	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Decke	10L	x [m] : 2,16		y [m] : 2,16		z [m]: 2,60		

Tabelle 6.5: Zusammenfassung von Messpunkten in Versuchen zum CO-Ausbreitungsverhalten

Die vollständigen Rahmenbedingungen, die in allen 4 Wiederholungsversuchen konstant blieben, fasst Anhang F.3 als zugehöriges Arbeitssystem zusammen. Da es sich um einheitliche Parameter für alle im Anschluss beschriebenen Berechnungen handelt, ist eine weitere Detaillierung nicht erforderlich.

6.2.3.2 Untersuchungsziele

Entgegen der Ausrichtung von Betrachtungen des Arbeitsschutzes, in denen der Personenaufenthalt eine wesentliche Einflussgröße darstellt, stehen aus den angeführten Untersuchungen zur CO-Ausbreitung lediglich Werte ohne Anwesenheit einer Person zur Verfügung. Allerdings weisen die Versuche aufgrund des verwendeten Messrasters einen Überblick über die räumliche Verteilung von Stoffkonzentrationen auf, die sich unter Vernachlässigung einer Raumlüftung ausbilden.

Neben der Überprüfung der Vollständigkeit und der getroffenen Schnittstellen zwischen den Modulen zur Informationsermittlung und zur Erfassung der Stoffausbreitung dienen die dokumentierten Messergebnisse der Versuche zur CO-Ausbreitung auch ohne Personenaufenthalt dem Untersuchungsziel der Validierung des Ausbreitungsmodells. Dies begründet sich einerseits in der Umgebungstemperatur bei Versuchsdurchführung sowie dem Verzicht auf eine Wärmefreisetzung in den "kalten" Versuchsszenarien, die vom ursprünglichen Anwendungsrahmen des Ausbreitungsmodells FDS abweichen. Andererseits bietet sich die Möglichkeit zu Sensitivitätsbetrachtungen im Hinblick auf den Personenaufenthalt für den Fall, dass keine Lüftung eines Raumes vorliegt. Anhand der Messergebnisse der rasterförmigen Anordnung der Messpunkte ist darüber hinaus die zeitgleiche Untersuchung der räumlichen Ausbreitungs- bzw. Konzentrationsberechnung durchführbar, die in den in Kap. 6.2.1 und Kap. 6.2.2 durch die begrenzte Anzahl an Messpunkten nur eingeschränkt bzw. nicht bestand.

6.2.3.3 Durchgeführte Berechnungen und Parametrisierung

Die durchgeführten Berechnungen zur CO-Ausbreitung im Versuchsraum bezogen sich auf die aufgeführten Rahmenbedingungen der Versuche. Die Einbindung der Eingangsgrößen beinhal-

¹²⁶ Die Ortsangaben beziehen sich auf die "linke, vordere" Raumecke (Ecke zwischen Wand mit Tür und der Seitenwand gegenüber der Emissionsfläche), die in der späteren Parametrisierung des Ausbreitungsmodells dem Nullpunkt des Koordinatensystems am nächsten lag. Die Anordnung der Ebenen und Benennungen der Messpunkte beziehen sich auf die Nomenklatur aus [99].

tete 699.840 Kontrollvolumen mit Kantenlängen von je 0,05 m in allen Raumrichtungen. Die geometrischen Rahmenbedingungen wurden auf diese Abstände gerundet, so dass Länge, Breite und Höhe sich in den Berechnungen auf 4,30 m, 4,35 m bzw. 2,60 m beliefen. Als Baustoffe verwendete die Parametrisierung die üblichen Konstruktionswerkstoffe Gipskarton und Beton für Wände und Decke sowie Holz bzw. Glas als Öffnungsverschlüsse unter Vernachlässigung weiterer (in den Versuchen ggf. vorhandener) Einrichtungsgegenstände, da hierzu keine detaillierten Informationen vorlagen. Die Berücksichtigung möglicher Undichtigkeiten in den Öffnungsverschlüssen pauschalisierte eine geringe Lecköffnung in der geschlossenen Zugangstür zum allgemeinen Druckausgleich. Die Parametrisierung entsprach weiterhin den dokumentierten Umgebungsbedingungen für Lufttemperatur und -druck, die Annahme für die relative Luftfeuchtigkeit belief sich auf 40 %.

Die Darstellung der Stofffreisetzung erfolgte über eine äquivalente Emissionsfläche von $0,0625 \text{ m}^2$ in der "rechten vorderen" Raumecke mit Wandabständen von jeweils 0,35 m und auf einer Höhe von 1,05 m. Die Grundlage zur Ermittlung des flächenspezifischen Emissions-Massenstroms bildete die maximale, theoretisch freigesetzte Gesamtmasse als zeitlicher Mittelwert über die Untersuchungsdauer von 30 min. Vor dem Hintergrund der unklaren und lediglich abgeschätzten Reaktionseffektivität der Reaktanden unterschieden die angenommenen stofflichen Umsetzungen die Berechnungsszenarien "001" (vollständige chemische Umsetzung), "002" (70 % Reaktionseffektivität), "003" (60 % Reaktionseffektivität) und "004" (50 % Reaktionseffektivität) als Berechnungsfälle. Diese Aufteilung ergibt sich aus der vollständigen chemischen Umsetzung, der in [99] vermuteten 50 %-igen Reaktionseffektivität sowie zwei an dieser orientierten Zwischenstufen zur weiteren Überprüfung dieser Aussage. Die Abstände der Messpunkte beliefen sich in den horizontalen Richtungen auf jeweils 1,10 m zueinander bei Berücksichtigung der gewählten, ebenenweisen Höhenanordnung.

Abb. 6.11 gibt einen Überblick über die Darstellung des Raums der CO-Versuche als Parametrisierung des Ausbreitungsmodells. Für Darstellungen der Versuchsaufbauten und der realen Parameterkonstellationen wird auf [99] verwiesen.

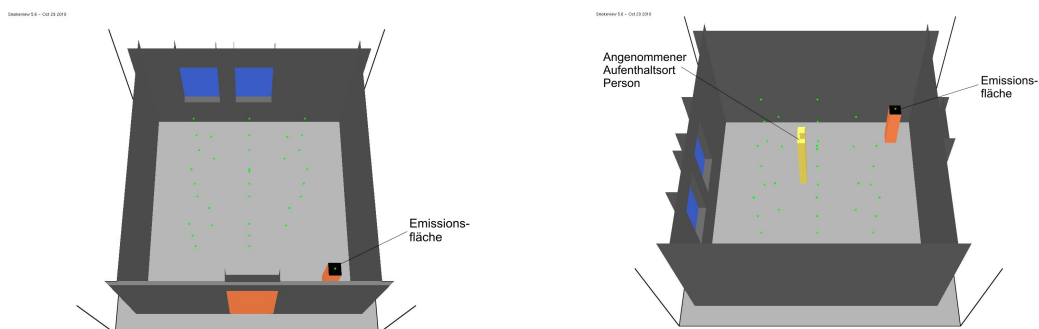


Abbildung 6.11: Berechnungsgeometrie für Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten [7]

Neben der Unterscheidung der Reaktionseffektivitäten erfolgten Sensitivitätsuntersuchungen im Hinblick auf den Einfluss der Anordnung einer Person in den verschiedenen Berechnungsszenarien. Die Veränderungen der berechneten Situationen beruhen somit auf der einhergehenden Wärmeemission. Der angenommene Aufenthaltsort der Person in den verschiedenen Berechnungen befand sich nicht in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle, sondern in den hinteren Raumbereich versetzt¹²⁷. Da kein Referenzwert vorlag, verzichtete die Parametrisierung auf die Anordnung eines Messpunktes im unterstellten Atembereich der Person. Die Berechnungen der

¹²⁷ Die detaillierte Positionsangabe ist in Relation zu den übrigen geometrischen Maßen im zugehörigen Arbeitssystem (vgl. Anhang F.3) angegeben.

verschiedenen Szenarien auf Grundlage der veränderten Reaktionseffektivitäten erfolgten daher doppelt: in der ursprünglichen Konfiguration ohne Person sowie mit angenommenen Personen-aufenthalt.

Die Eingangsgrößen der verschiedenen Berechnungsszenarien, die über die Angaben des zugehörigen Arbeitssystems hinausgehen, sind tabellarisch in Anhang G.3 zusammengefasst. Die Übersicht verdeutlicht die getroffenen Variationen der Berechnungsszenarien, die im Vergleich und in der anschließenden Ergebnisbewertung und -interpretation einheitlichen Versuchsbedingungen gegenüberstehen.

6.2.3.4 Auswertung

Entgegen der Auswertungen in [99], welche auf Mittelwerten aus den 4 Einzelversuchen beruhen, vergleichen die Gegenüberstellungen die unmittelbaren Messergebnisse mit den berechneten Konzentrationsverläufen. Die Messergebnisse sind in Anhang H.3.1 ebenenweise je Versuchsdurchgang als Übersichten zusammengefasst und weisen für die einzelnen Versuchsdurchgänge voneinander abweichende Werte auf. Dies deutet auf die auch bei Messungen auftretenden Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten hin. Da vor allem die genauen Emissionsbedingungen, insbesondere der tatsächliche Emissions-Massenstrom aufgrund der Reaktionseffektivität sowie die reaktionsbedingten Temperaturen, unbekannt sind, ist die unmittelbare Vergleichsführung zwischen einem Versuch und einem konkret entsprechenden Berechnungsszenario nicht möglich. Vielmehr führt die Auswertung und Analyse der Vergleiche zur Interpretation allgemeiner Tendenzen und deren Nachvollziehbarkeit im Verhalten der Berechnungsergebnisse.

Laut Versuchsbeschreibung waren die Öffnungen des genutzten Raumes über weite Teile der Untersuchungsdauern geschlossen, so dass keine Belüftung vorlag. Die Stofffreisetzung erfolgte gleichermaßen weitestgehend konstant. Da die Annahme besteht, dass die freigesetzte Stoffmasse nahezu vollständig im Versuchsraum verblieb, müssen die Stoffkonzentrationen an allen Messpunkten mit der Zeit anwachsen. Unterschiede in den Konzentrationsniveaus resultieren sowohl aus dem Abstand zur Emissionsquelle als auch aus der Höhenlage des Messpunkts.

Gründe für Schwankungen bzw. kurzfristige lokale Störungen ergeben sich aus Luftströmungen bzw. Umwälzungen der Raumluft, die bspw. auf geringen Temperaturunterschieden oder dem Impuls der Stofffreisetzung beruhen. Aufgrund des hohen Diffusionsvermögens weist CO darüber hinaus die Eigenschaft auf, in bzw. durch Bauteile diffundieren zu können (vgl. z.B. [103]). Sofern sich Personen innerhalb des Raumes aufgehalten hätten, wären Luftbewegungen, die ggf. zur Stoffausbreitung beitragen, auf die entsprechende Wärmefreisetzung zurückzuführen.

Bei relativ ruhigen Strömungsbedingungen lässt sich das stoffspezifische Ausbreitungsverhalten in groben Zügen aus den Eigenschaften abschätzen: CO weist eine geringfügig niedrigere Dichte als Umgebungsluft auf, so dass generell eine Tendenz zur Ausbreitung in Richtung Decke, von der Emissionsquelle weg und ggf. bei Auftreffen auf Oberflächen (z.B. Wände) zum Absinken an diesen besteht. Als ebenenspezifische Betrachtung ist weiterhin anzunehmen, dass die Messpunkte in höher gelegenen Raumbereichen früher als die darunter liegenden ansprechen und generell früher höhere Konzentrationen registrieren. Die Konzentrationsbildung verläuft geschichtet von der Raumdecke aus, wobei die mögliche Diffusion in Bauteile ggf. zu einer nicht erfassbaren Konzentrationsverringerung führt.

6.2.3.4.1 Spezifische Vergleichssystematik

Die relative Analyse und Bewertung von Berechnungsergebnissen zu mehreren und voneinander abweichenden Referenzwerten erfordert ein besonderes Vorgehen, da gemeinsame Vergleiche

allgemeiner Tendenzen sowie ggf. Gegenüberstellungen von Berechnungsergebnissen mit verschiedenen Versuchsergebnissen notwendig sind. Zum Beleg von Aussagen, die der Validierung des Ausbreitungsmodells dienen, verwendet die Vergleichsführung die Gesichtspunkte

- der ortsbezogenen Vergleiche der gemessenen Luftkonzentrationen zur Identifizierung charakteristischer Tendenzen;
- der ortsbezogenen Vergleiche der berechneten Luftkonzentrationen zur Ermittlung qualitativer Ähnlichkeiten unter Berücksichtigung der verschiedenen unterstellten Reaktionseffektivitäten bzw. Emissions-Massenströmen durch
- die Gegenüberstellung gemessener und berechneter Charakteristika in Konzentrationsverläufen sowie
- der Rückschlüsse und Bewertung durch Verwendung der allgemeinen Vergleichsaspekte und -systematik aus Kap. 6.2.2.

Durch diese vollständige Untersuchung aller Ergebnisse gegeneinander lassen sich nicht nur die modellbasierte Wiedergabe gemessener Charakteristika aufzeigen und bewerten, sondern auch ggf. Rückschlüsse auf die tatsächlichen Versuchsbedingungen ziehen. Gleichzeitig stellen die Relationen der Berechnungsergebnisse zueinander Sensitivitätsuntersuchungen zum veränderten Emissions-Massenstrom dar.

Die Vergleichssystematik verzichtet dagegen auf Ermittlung und Auswertung der statistischen Kennwerte, da detaillierte Referenzbedingungen nicht feststehen. Die statistischen Kennwerte können somit nicht auf eine nachgewiesene Grundlage, auf die die Berechnungsergebnisse bezogen werden, gestellt werden.

6.2.3.4.2 Beschreibung

Im globalen Vergleich der 4 Versuchsreihen weist Versuch 1 signifikant geringere Werte als die übrigen Versuche auf, die mit Abweichungen zueinander vergleichbare Ergebnisse aufweisen. Die Versuchsdokumentation gibt keine Ursache der maßgeblichen Abweichung an (z.B. messtechnische Fehler, doch vorhandene Raumlüftung etc.). Da auch die Berechnungsergebnisse keine Ähnlichkeit mit den Ergebnissen des Versuchs 1 aufzeigen, schließt der Verfasser der vorliegenden Dissertation diese Versuchsergebnisse als Ausreißer von den weiteren Betrachtungen aus. Die im Anschluss erläuterten Untersuchungen beruhen auf den gemessenen Konzentrationsverläufen der Versuchsreihen 2-4 (im Folgenden V2, V3 und V4).

Im Überblick der verschiedenen Ergebnisse treten allgemein, sowohl in gemessenen als auch in berechneten Stoffkonzentrationen, zwei grundlegende Muster des Zeitverlaufs auf:

- im Mittel kontinuierlicher Konzentrationsanstieg über die Versuchsdauer hinweg oder
- sprunghafter Anstieg auf höheres Konzentrationsniveau, das im Anschluss grundsätzlich bestehen bleibt.

Die berechneten Konzentrationsverläufe verfügen über größere Schwankungen als die gemessenen Werte. Dabei kennzeichnen ggf. auch kurz- bzw. mittelfristige Erhöhungen (bezogen auf die Untersuchungsdauer) der berechneten Stoffkonzentrationen deren sprunghaften Anstieg, dessen Konzentrationsniveau im Anschluss bzw. im Nachweis nicht auftritt.

Der Vergleich der experimentellen Versuchsdurchgänge weist beide Verlaufsmuster als ortsspezifische Charakteristika nach: An den Messpunkten der obersten Messebene 1 verfügen die Konzentrationsverläufe i.d.R. über einen sprunghaften Anstieg, der versuchs- und ortsabhängig zu

unterschiedlichen Konzentrationsniveaus führt oder mit Verzögerungen (später in der Versuchsdurchführung) auftritt. Dabei erreichen die Messwerte für V3 die höchsten Luftkonzentrationen, gefolgt von V4 und V2. Ausnahmen bilden die Messpunkte "12D" und "16D" (Konzentrationsprung nur in V3) sowie "15D" (Konzentrationsprung in V3 und V4).

Die Berechnungsergebnisse verfügen für die Messebene 3 über die Szenarien hinweg ebenfalls über qualitative Ähnlichkeiten der ortsbezogenen Konzentrationsverläufe. Allerdings beruhen diese in den Berechnungsszenarien 002, 003 und 004 im Wesentlichen auf einem kontinuierlichen Konzentrationsanstieg (Ausnahmen: Messpunkte "12D" für 002, "15D" und "3L" für alle Szenarien mit Verzögerungen sowie "6L" ohne Konzentrations sprünge in allen Szenarien), wogegen die Ergebnisverläufe des Berechnungsszenarios 001 Konzentrations sprünge erkennen lassen. Bei Wiedergabe des sprunghaften Konzentrationsanstiegs tritt dieser mit Verzögerungen auf und führt zu unterschiedlichen Konzentrationsniveaus. Erwartungsgemäß werden die höchsten Konzentrationen für das Berechnungsszenario 001 errechnet (folgend: 002, 003 und 004).

Auf der Messebene 2 weisen die Messergebnisse ebenfalls beide Verlaufsmuster auf:

- sprunghafter Konzentrationsanstieg:
"6D" (mit zeitlichen Verzögerungen der Versuchsdurchgänge zueinander), "2D" (V3), "8L" (kein Messwert für V2 verfügbar), "2L" und "5L";
- tendenziell sprunghafter Konzentrationsanstieg mit unscharfer Abgrenzung:
"4D".
- kontinuierlicher Konzentrationsanstieg:
"8D", "10D" und "2D" (V2 und V4).

Die Relation der erreichten Konzentrationsniveaus bleibt weiterhin bestehen und äußert sich bei sprunghaften Konzentrationsanstiegen in zeitlichen Verzögerungen.

In den Berechnungsergebnissen wiederholt sich der Unterschied zu den Messwerten, indem auch auf Messebene 2 i.d.R. ein kontinuierlicher Konzentrationsanstieg für die Berechnungsszenarien eintritt. Die Konzentrations sprünge werden lediglich an den Messpunkten "6D" (alle Szenarien mit Verzögerungen und Niveauunterschieden) sowie "2L" (Szenarien 001 und 002 als kurzfristige Anstiege) qualitativ mit den Messergebnissen übereinstimmend festgestellt. Im Übrigen weisen die ortsspezifischen Berechnungsergebnisse untereinander qualitativ ähnliche Verläufe auf, die zu unterschiedlich hohen Konzentrationsniveaus in der auf Messebene 3 ermittelten Abstufung neigen. Ausnahme hiervon bildet ebenfalls der Messpunkt "2D", an dem sowohl durch kurzfristige Anstiege als auch im allgemeinen Konzentrationsniveau vergleichbare Bedingungen auftreten.

Auf der untersten Messebene weisen die gemessenen Konzentrationsverläufe mit Ausnahme der Messpunkte "1L" und "4L" kontinuierliche Konzentrationsanstiege auf. Die in den anderen Messebenen festgestellte Abstufung der Luftkonzentrationen zueinander bleibt ebenso bestehen. An den ausgenommenen Messpunkten liegt das Konzentrationsniveau von V3 ebenso über V2 und V4, die jedoch ähnliche Werte anstreben.

Die berechneten Konzentrationsverläufe stellen in dieser Messebene allgemein kontinuierliche Anstiege mit unterschiedlichen Konzentrationshöhen bei qualitativer Ähnlichkeit dar. Die auf den anderen Messebenen ermittelte Abstufung bleibt bestehen. Alleine am Messpunkt "1L" liegt übereinstimmend mit den Messergebnissen ein sprunghafter Konzentrationsverlauf vor.

Die Messung unmittelbar unter der Raumdecke ist keiner Messebene zugeordnet und bildet den höchstgelegenen Messpunkt. In den Messergebnissen treten verschiedene Verläufe auf: Während im Versuch V3 ein sprunghafter Konzentrationsanstieg eintritt, weisen die Versuche V2 und V4

tendenziell kontinuierliche Anstiege auf. Die gemessenen Konzentrationsverläufe liegen weiterhin auf verschiedenen Niveaus, wobei die höchsten Konzentrationen ebenfalls im Versuch V3 gemessen wurden.

Dementgegen kennzeichnen kontinuierliche Konzentrationsverläufe die allgemeine Entwicklung der Berechnungsergebnisse aller Szenarien. Die Verläufe stellen durch die qualitative Ähnlichkeit und die Abstufung der Konzentrationsniveaus die entsprechend berücksichtigten Reaktions-effektivitäten dar.

Im unmittelbaren Vergleich gemessener und berechneter Luftkonzentrationen werden in Abhängigkeit zum jeweiligen Versuchsdurchgang und Berechnungsszenario sowohl ungefähre Übereinstimmungen als auch i.A. Über- oder Unterschätzungen festgestellt. U.a. aufgrund der qualitativen Unterschiede der Verläufe ergeben sich diese Abweichungen jedoch nicht einheitlich, sondern treten in allen Vergleichen an verschiedenen Messpunkten voneinander unabhängig und gleichzeitig auf. Die zueinander abgestuften Stoffkonzentrationen der Berechnungsszenarien führen dazu, dass sich in ortsspezifischen Vergleichen durchaus Annäherungen feststellen lassen. Tab. 6.6¹²⁸ skizziert messpunktbezogen die Relationen der Berechnungsergebnisse mit den Messwerten¹²⁹.

Messpkt.	Versuch 2				Versuch 3		Versuch 4	
	001	002	003	004	001	002	001	002
12D	+ (=)	+, -	+, -	+, -	-, -	-, -	-	-
13D	-, +	-	- (=)	-	-, -	-, -	-, -	-, -
16D	-	-	-	-	-	-	= (-)	-
14D	+	+, -	+ -	+, -	-	-	-, +	-
15D	++	+, -	+, -	+, -	-	-	-	-
9L	-	-	-	-	-, -	-, -	-	-
3L	-	-	-	-	-, -	-, -	-	-
6L	-	-	-	-	-, -	-, -	-	-
6D	-, =	+, =	= (-)	+, -	-	-	= (+)	-
8D					= (+), +	-	= (+,-)	= (+), -
10D	= (+)	+, -	+, -	-	=, -	-	=, -	-
2D	+	+	= (+)	= (-)	+, -	+, -	++, = (-)	++, -
4D	+	+	= (+)	= (-)	+ (=), +	+ (=), +	= (+), ++	= (+), +-
8L					-	-	-	-
2L	+	+	= (-)	=, -	-, ++	-, +	-, +	-, +
5L	= (+,-)	= (-)	-	-	=, -	- (=), -	-	-
5D	++	++	+	+	++	++, =	++	++
7D	++	++	++, -	- (=)	+	+ (=)	+	+ (=)
9D	+	= (+)	+	+ -	+, =	-	+	= (+)
1D	++	++	+	+	++	++	++	++, =
3D	++	++	+	+	++	++	++	++
7L	++	++	+ (=)	= (+)	+ (=)	+, -	= (+,-)	= (+), -
1L	++	++	+	+	++	++	= (+), ++	= (+), +
4L	-	-	-	-	-, =	-	-	-
10 L	++	++	+	+	-, +	-, +	+	+ (=)

Tabelle 6.6: Zusammenfassung der Vergleiche von Konzentrationsverläufen (CO-Versuche)

¹²⁸ Kurzformen der Darstellung: “+” entspr. Überschätzung, “++” entspr. erheblicher Überschätzung, “-” entspr. Unterschätzung, “-” entspr. erheblicher Unterschätzung, “=” entspr. Übereinstimmung, “()” entspr. weiterer Tendenz, “,” entspricht Darstellung als Entwicklung, “+ -” entspr. Schwankung mit wechselweiser Über- und Unterschätzung.

¹²⁹ Für die Versuche 3 und 4 wurde aufgrund der Gegenüberstellung mit den Szenarien 001 und 002, vor dem Hintergrund der generell niedrigeren Konzentrationsverläufe sowie den aus der Auswertung zu Versuch 2 bekannten Bedingungen auf die Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Berechnungsszenarien 003 und 004 verzichtet.

Die Berechnungsergebnisse der verschiedenen Szenarien unter Berücksichtigung eines angenommenen Personenaufenthalts entsprechen qualitativ den Konzentrationsverläufen ohne Personenaufenthalt. Die dortigen Muster verändern sich i.A. nicht und bleiben als Charakteristika der Berechnungsergebnisse bestehen. Die Anwesenheit einer Person äußert sich in den Berechnungsergebnissen einerseits durch geringere Schwankungen der Konzentrationen, so dass Extremwerte kurzfristiger Konzentrationsanstiege in weiten Teilen nicht auftreten. Andererseits weisen die Verläufe die verschiedenen Maximalwerte und charakteristischen Ausrichtungen mit deutlicherem Verlauf nach. Im Überblick über alle Messpunkte liegen die berechneten Stoffkonzentrationen innerhalb der Szenarien auf ausgeglichenerem Niveau bzw. in ähnlichen Höhen. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der unterschiedlichen Versuchsdurchgänge zeigt im Einzelfall andere Entwicklungen der Übereinstimmung bzw. der Unter- und Überschätzungen. Dies resultiert aus den verdeutlichten charakteristischen Verläufen, die ggf. andere Konzentrationsniveaus bedingen. Es zeigt sich, dass daraus auch tendenzielle Übereinstimmungen von Mess- und Berechnungsergebnissen resultieren. Diese treten allerdings teilweise für eine andere angenommene Reaktionseffektivität ein.

6.2.3.4.3 Diskussion und Interpretation

Die aufgezeigten ortsabhängigen Konzentrationsverläufe belegen anhand der verschiedenen charakteristischen Muster, dass die Versuchsergebnisse den erwarteten Ausbreitungsbedingungen grundlegend entsprechen. Die sprunghaften Konzentrationsanstiege mit anschließendem Verbleib der gemessenen Stoffkonzentrationen auf ähnlich hohen Niveaus folgen aus einer gerichteten Stoffausbreitung in strömungsähnlicher Form. Ein plötzlicher Anstieg symbolisiert in diesem Sinne eine frontartige Ausbreitung (radial von der Quelle weg bzw. an Wänden horizontal abwärts), dessen Zeitpunkt den Ausbreitungsfortschritt charakterisiert. Prinzipiell bilden alle Versuchsdurchgänge im Gesamten die nachstehende charakteristische Ausbreitung ab:

- CO-Aufstieg unter die Raumdecke;
- radiale Ausbreitung, vorzugsweise in Richtung der gegenüberliegenden Außenwand mit Fenstern;
- Abströmung nach Auftreffen des Stoffstroms auf die Wände in Richtung Boden;
- geschichtete Konzentrationserhöhung von der Decke Richtung Boden;
- gleichzeitig zur Stoffausbreitung unter der Decke Konzentrationserhöhung im Nahbereich der Emissionsquelle.

Aus der qualitativen Beschreibung der Stoffausbreitung bzw. des Auftretens von Konzentrationen an unterschiedlichen Messpunkten ist ersichtlich, dass eine Vorzugsrichtung der radialen Stoffausbreitung in Richtung der Außenwand eintritt, was [99] detailliert ausführt. Obwohl laut Versuchsbeschreibungen keine Störeinflüsse durch Luftbewegungen im Versuchsraum (z.B. durch Lüftung oder Personenaufenthalt) auftraten, ist eine Begründung alleine vor dem Hintergrund der dichtebedingten Stoffausbreitung nicht möglich. Ursachen für die entwickelte Vorzugsrichtung können bspw. geringe Undichtigkeiten in den Öffnungsabschlüssen und Wänden (insbesondere der Tür), eine Thermik aufgrund der chemischen Reaktion sowie Temperatureinflüsse an den raumbegrenzenden Bauteilen sein.

Die ermittelten Verhältnisse verstärken sich darüber hinaus durch eine ggf. zeitlich ungleichmäßige Stofffreisetzung: Aus einer plötzlichen Freisetzung resultiert unmittelbar eine höhere Stoffkonzentration, die sich im weiteren Verlauf ausbreitet und dabei zu weitreichenderen Sprüngen der Messwerte führt. Die entsprechende Strömung kann dabei z.B. auf der Stoffdichte (für CO:

geringfügig niedriger als Umgebungsluft) beruhen. Allerdings sprechen die in den Versuchsergebnissen gleichzeitig vorzufindenden Konzentrationsverläufe gegen eine unmittelbar vollständige Freisetzung.

In Relation der ortsbezogen gemessenen Konzentrationsverläufe zueinander treten charakteristische Unterschiede in der Höhe der Messwerte sowie in den zeitlichen Abfolgen (als Verzögerungen) auf. Da diese Bedingungen sich global über alle Messpunkte hinweg, mit wenigen Ausnahmen, mit ähnlichen Verhältnissen entwickeln, ergibt sich die Schlussfolgerung, dass trotz gleicher Versuchsbedingungen in den einzelnen Durchgängen unterschiedliche Reaktionseffektivitäten bzw. Emissions-Massenströme auftraten.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse (ohne Personenaufenthalt) untereinander ergibt qualitativ weitgehend einheitliche Verläufe, deren Entwicklung zu unterschiedlichen Konzentrationsniveaus führt. Die festgestellte Abstufung dieser Verläufe entspricht der Parametrisierung der Emissions-Massenströme: Das Berechnungsszenario mit der höchsten Stofffreisetzung (001) bewirkt auch die höchsten Konzentrationsbedingungen, die übrigen Szenarien folgen in entsprechender Differenzierung. Als charakteristischer Konzentrationsverlauf wird i.A. ein mit Schwankungen um einen Mittelwert kontinuierlicher Anstieg errechnet. Die Kombination dieser Bedingungen lässt die Interpretation zu, dass einerseits rechnerisch der Massenerhaltung innerhalb des Betrachtungsraums entsprochen wird. Andererseits bildet die Höhe des Emissions-Massenstroms einen relevanten Einflussfaktor auf die berechnete Stoffausbreitung, der sich erwartungsgemäß, insbesondere ohne weitergehende Lüftungsbedingungen, unmittelbar auf die ortsbezogenen Konzentrationen auswirkt.

Der Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse zeigt auf, dass die gemessenen zeitlichen Konzentrationsverläufe, die nicht einem kontinuierlichen Konzentrationsanstieg entsprechen, in weiten Teilen qualitativ nicht bzw. nur ansatzweise wiedergegeben werden. Aus dem Bezug der ortsbezogenen Gegenüberstellungen auf die jeweiligen Messebenen bzw. -höhen ergibt sich, dass unabhängig von der Charakteristik des Konzentrationsverlaufs Über- und Unterschätzungen bzw. ineinander übergehende Abweichungsverhältnisse (aufgrund der qualitativen Unterscheidungen) bestehen. Die Höhe dieser Abweichungen ist dabei auf die Emissions-Massenströme zurückzuführen, aus denen bei vergleichbaren Verhältnissen zwischen den Berechnungsszenarien ein Wechsel zwischen Über- und Unterschätzungen entsteht. Allgemein werden folgende Zusammenhänge identifiziert (vgl. Tab. 6.6):

- Ebene 1:
Tendenz zur (teils deutlichen) Unterschätzung der gemessenen Konzentrationen durch Berechnungsergebnisse (Ausnahme: Versuch 4 mit allgemein geringerem Konzentrationsniveau in Verbindung mit hohen für Berechnungsszenarien angenommenen Emissions-Massenströmen);
- Ebene 2:
Tendenz zu ähnlichen Konzentrationsniveaus mit relativ geringen Über- und Unterschätzungen, um die sowohl Mess- als auch Berechnungsergebnisse schwanken (erkennbar aus Darstellungen mit gleitenden Mittelwerten, Ausnahme: Versuch 4 analog zu Ebene 1);
- Ebene 3:
Tendenz zur (teils deutlichen) Überschätzung der gemessenen Konzentrationen durch Berechnungsergebnisse;
- Decke:
Versuchs- und szenarioabhängig sowohl Über- als auch Unterschätzungen.

In Verbindung mit dem kontinuierlichen Konzentrationsanstieg verdeutlicht die Aufstellung, dass die Ausbreitungsrechnungen nicht die gemessene Stoffausbreitung in Strömungsform abbil-

den. Weiterhin weisen die Ergebnisse eine Stoffausbreitung auf, die entgegen der Versuchsergebnisse nicht unmittelbar nach der Emission in Richtung der Raumdecke führt, sondern zunächst in Höhe der Emissionsfläche verbleibt bzw. im Anschluss absinkt. Die Emissionsbedingungen widersprechen sich in den Voraussetzungen, die für einen stoffbedingten Auftrieb erforderlich sind.

In den Ergebnissen des Berechnungsszenarios 001 und ansatzweise in einigen Werten aus 002 sind teilweise sprunghafte Konzentrationsanstiege auf der höchsten Messebene sowie an charakteristischen Messpunkten erkennbar. Dieses Verhalten tritt jedoch nicht unmittelbar unter der Raumdecke auf. Das Szenario 001 verwendet den höchsten Emissions-Massenstrom, aus dessen Parametrisierung im Ausbreitungsmodell sich höhere Freisetzungsgeschwindigkeiten ergeben. Daraus folgt ein höherer Impuls, der einen Stoffaufstieg in Richtung der Raumdecke nach der Freisetzung begünstigt. Dies bestätigt die These, dass die Darstellung der tatsächlichen Emissionsbedingungen einen auftriebsbegünstigenden Einflussfaktor vernachlässigt.

Aus der Bewertung der ortsbezogenen Abbildung von Konzentrationssprüngen in den Berechnungsergebnissen folgt, dass die Wiedergabe der in den Messwerten erkennbaren Vorzugsrichtung der Stoffausbreitung nicht übereinstimmt: Sofern erkennbar, tritt in den Berechnungsergebnissen auf der obersten Messebene eine frontartige Ausbreitung radial über die Raumdiagonale hinweg auf. Dies korrespondiert mit der Überlegung, dass diese Ausbreitungsrichtung durch das Strömen in Deckenrichtung in Verbindung mit dem Auftreffen an die unmittelbar benachbarten Wände entsteht. Auf Messebene 2 tritt eine Tendenz des Konzentrationssprungs im Messpunkt "6D" auf, der sich ebenfalls über die Raumdiagonale hinweg am äußersten Punkt gegenüber der Freisetzungquelle befindet; es wird der dortige Abstrom an den Raumwänden erfasst. Der Messpunkt "1L" (Messebene 3) befindet sich dagegen in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle (nicht in der berechneten Hauptausbreitungsrichtung), dessen Konzentrationssprung mutmaßlich aus dieser Nähe resultiert.

Die Abweichungen am Messpunkt unmittelbar unter der Raumdecke weisen sowohl auf die nicht korrekte Wiedergabe einer bevorzugten Ausbreitungsrichtung als auch auf eine Fehleinschätzung der CO-Anreicherung in verschiedenen Raumhöhen hin. Während die Versuchsergebnisse scheinbar nach einem "Aufprall" des freigesetzten Stoffes ein geringfügiges Absinken wiedergeben, stellen die Berechnungsergebnisse weiterhin eine radiale Ausbreitung dar. Dafür spricht auch die Relation des (um Schwankungen gemittelten) ähnlich hohen Konzentrationsniveaus zu den Ergebnissen der Messpunkte auf der obersten Messebene.

Gegenüber den Messwerten weisen die Berechnungsergebnisse deutlich größere Schwankungen auf, die sich um Mittelwerte herum orientieren. Binden die Berechnungen eine Person als Wärmequelle im Zuge der Sensitivitätsuntersuchungen ein, treten diese i.A. weniger stark auf. Dieses Ergebnis unterstützt die Schlussfolgerung, dass während der Versuchsdurchgänge eine Beeinflussung des Raums durch wärmebedingte Effekte eintrat, die nicht aus der Dokumentation hervorgeht. Die Sensitivitätsberechnungen zeigen weiterhin ausgeglichene Konzentrationsverhältnisse über den Versuchsraum hinweg. Dies bekräftigt die durch die Untersuchungen auf Grundlage der Kalibrierversuche im IPA-Expositions-labor (vgl. Kap. 6.2.2) gewonnenen Erkenntnisse, dass ein Personenaufenthalt zur Homogenität ortsbezogener Konzentrationen beiträgt. Die Aussage ist umso wichtiger, da an dieser Stelle keine bzw. eine geringe Beeinflussung der Werte durch eine Raumlüftung besteht, welche den Effekt ggf. überdecken würde. Die Wirkung der Wärmefreisetzung in sonst ruhender Umgebung entsteht durch konvektive Luftströmungen und die dadurch eintretende Umwälzung bzw. Verwirbelung der Raumluft.

Im Rückschluss der Berechnungsergebnisse auf die Messwerte bestätigt sich die Vermutung voneinander abweichender Rahmenbedingungen: Höhere Emissions-Massenströme rufen einerseits die Ausbildung einer frontartigen Stoffausbreitung hervor. Andererseits treten größere Konzentrationswerte auf. Korrespondierend dazu wird daher für Versuch 3 (in Abstufung Versuch 4

und 2) ein größere bzw. schnellere Stofffreisetzung unterstellt. Der alleinige Nachweis eines Konzentrationssturms am Messpunkt "16D" (Ebene 1, größte radiale Entfernung zur Freisetzungquelle) unterstützt diese These.

Unabhängig von den Betrachtungen zur Berechnung der Stoffausbreitung bestätigen die Untersuchungen die Eignung und Funktionalität der Konkretisierung des Arbeitssystems und dessen Schnittstellen zum Modul zur Erfassung der Stoffausbreitung für die Verwendung innerhalb der WEA. Im Zuge der Parametrisierung des Ausbreitungsmodells ist die Wichtigkeit der korrekten Anwendung von Faktoren zur Einheitenkonvention (hier: für die Ermittlung des flächenspezifischen Emissions-Massenstroms) erneut herauszustellen.

6.2.3.5 Schlussfolgerungen

Auch wenn keine unmittelbaren Übereinstimmungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen im Gesamten nachgewiesen werden können, lassen sich aus den Untersuchungen der CO-Ausbreitungsversuche unter Verwendung des Ausbreitungsmodells FDS Aussagen für dessen Validierung bzw. für Anwendungsbedingungen ableiten. Allgemein begründen die Ergebnisse folgende Erkenntnisse bezüglich der Ausbreitungsrechnung und Modellsensitivität:

1. Die Höhe des Emissions-Massenstroms hat unmittelbaren Einfluss auf die berechneten Konzentrationshöhen, wobei qualitative Verläufe bei unterschiedlichen Konzentrationshöhen und sonst gleichen Rahmenbedingungen tendenziell übereinstimmend wiedergegeben werden.
2. Für die realitätsgetreue Berechnung ortsbezogener Stoffkonzentrationen ist die möglichst detaillierte Erfassung und Verwendung des Emissions-Massenstroms erforderlich. Dies bezieht sich sowohl auf die Höhe als auch auf die zeitliche Gleichmäßigkeit des Parameters, dessen Abweichungen sich in charakteristischen Konzentrationsverläufen äußern.
3. Zu erwartende Konzentrationsunterschiede infolge verschieden hoher Stofffreisetzungen werden in den Berechnungsergebnissen abgebildet und führen zu unterschiedlichen Ausprägungen berechneter Stoffkonzentrationen sowie zeitlichen Verzögerungen des Konzentrationsanstiegs.
4. Weitere Emissionsbedingungen (z.B. Temperatur und Geschwindigkeit) beeinflussen die Stoffausbreitung, insbesondere den unmittelbar an die Freisetzung anschließenden vertikalen (impulsbedingten) Auftrieb.
5. Wärmefreisetzungen (z.B. durch einen Personenaufenthalt) wirken sich auf die berechneten Konzentrationen bzw. auf deren ortsbezogene Schwankungen und räumliche Homogenitäten aus.
6. Im Vergleich mit anderen Validierungsstudien überdecken sich in diesen unterschiedliche Strömungsbedingungen (z.B. Wärmefreisetzung, Lüftung etc.) zum Teil gegenseitig.
7. Die Schnittstellen der Module zur Informationsermittlung und zur Erfassung der Stoffausbreitung sind so gestaltet, dass eine Anwendung erfolgen kann. Die definierten Faktoren zur Einheitenkonvention stellen die Verwendung korrekter Parameter sicher.

Aus diesen Untersuchungsergebnissen erfolgt die Ableitung bzw. Bestätigung von Bedingungen zur Anwendung des Ausbreitungsmodells für den Einsatz im Rahmen des entwickelten Konzepts der WEA zur Gefährdungsbeurteilung:

1. Die Datenübergabe bzw. -übernahme zwischen den Modulen (hier: Informationsermittlung und Abschätzung der Stoffausbreitung) erfolgt unter Berücksichtigung der definierten Faktoren zur Einheitenkonvention.
2. Die Stofffreisetzung bedarf einer in allen Emissionsparametern möglichst vollständigen und detaillierten Erfassung und Übertragung als Eingangswert in das Ausbreitungsmodell. Dies bezieht sich sowohl auf Höhe und zeitlichen Verlauf des Emissions-Massenstroms als auch auf begleitende Rahmenbedingungen (z.B. Stofftemperatur bei Freisetzung, Freisetzungsgeschwindigkeit, Äquivalenz der Emissionsfläche etc.).
3. Die Lüftungsbedingungen müssen möglichst genau abgeschätzt werden. Dies wird umso wichtiger, je geringer die anzutreffenden bzw. zu erwartenden Volumenströme sind, da bereits geringfügige Änderungen die Stoffausbreitung beeinflussen können (z.B. durch Ausbildung einer Vorzugsrichtung).
4. Der Personenaufenthalt und sonstige thermische Einflussbedingungen erfordern eine möglichst genaue Abschätzung, da die Wärmefreisetzung für ortsabhängige Konzentrationschwankungen und -gleichmäßigkeiten relevant ist.
5. Ist eine genaue Abschätzung der genannten Rahmenbedingungen nicht möglich, müssen die berechneten Konzentrationsverläufe mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren betrachtet werden. Bei Annahme von Rahmenbedingungen finden ungünstige Bedingungen (z.B. hohe Emissions-Massenströme und geringe Lüftungsverhältnisse) Berücksichtigung.

6.3 Aussagen und Interpretation der Validierungsuntersuchungen

Die in Kap. 6.2.1 bis Kap. 6.2.3 dargestellten und bewerteten Ergebnisvergleiche weisen verschiedene Erkenntnisse zur Genauigkeit und Sensitivität der WEA als Gesamtverfahren sowie im Speziellen des Ausbreitungsmodells FDS zu dessen Verwendung im Rahmen der stoffbezogenen Gefährdungsbeurteilung nach. Da die Untersuchungen verschiedene Versuchs- bzw. Szenariogestaltungen und Sensitivitätsanalysen für Reinstoffe einbeziehen, gelten die gewonnenen Aussagen in ihrer Gesamtheit für verschiedene

- Versuchsstoffe als Reinstoff,
- Emissionsbedingungen und Stoffkonzentrationen,
- Konzentrationsverläufe (zeitabhängige Anlauf- und Abklingkurven),
- Raumluchtwechsel und Anordnungen der Zu- und Abluftflächen sowie
- zusätzliche Rahmenbedingungen (z.B. Personenaufenthalt, Raumlufttemperaturen, weitere Strömungseinflüsse etc.).

Den gewonnenen Erkenntnissen wird daher eine hohe Genauigkeit in Bezug auf die untersuchten Rahmenbedingungen unterstellt, wie sie die Anwendung im Arbeitsschutz aufgrund der Unterschiedlichkeit von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen erfordert. Die Ergebnisse lassen die Annahme einer Allgemeingültigkeit bzw. einer allgemeinen Verwendbarkeit der WEA bei Berücksichtigung von Anwendungsbedingungen zu, die jedoch an dieser Stelle nicht nachgewiesen ist und weitere methodische Untersuchungen erforderlich macht. Die praktische Verwendbarkeit muss im Einzelfall durch den Anwender unter Berücksichtigung der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen ermittelt werden. Bei abweichenden Rahmen- oder Umgebungsbedingungen müssen detaillierte Überlegungen zur begründeten Übertragbarkeit bzw. zum analogen Einsatz der WEA erfolgen.

6.3.1 Zusammenfassung der Validierungsaussagen

Die dargestellten Untersuchungen erbringen die folgenden Aussagen zur Genauigkeit und Sensitivität, die sich aus den Einzelergebnissen ergeben und einander ergänzen:

1. Die konzeptionellen Module der WEA (vgl. Kap. 5) sind methodisch und fachlich-inhaltlich aufeinander abgestimmt. Für die Schnittstellen besteht der Nachweis der Funktionalität (z.B. Gültigkeit verschiedener Umrechnungsfaktoren zur Einheitenkonvention). Das konkretisierte Arbeitssystem-Modell ermöglicht die einheitliche und vollständige Informationsermittlung für alle nachfolgenden Module.
2. Das Ausbreitungsmodell besitzt für die gasförmige Ausbreitung von Reinstoffen in der Raumlucht unter Berücksichtigung verschiedener Voraussetzungen und Anwendungsbedingungen eine hohe Genauigkeit (vgl. Kap. 6.3.2). Bei vollumfänglich und genau bekannten Rahmenbedingungen sind geringe Abweichungen zwischen Berechnungsergebnissen und gemessenen Konzentrationsverläufen zu erwarten. Allgemein beeinflusst die Genauigkeit der Eingangsparameter die Ergebnisgenauigkeit.
3. Ergebnisbeeinflussende Faktoren für die Konzentrationsverläufe sind insbesondere die Emissionsbedingungen (Emissions-Massenstrom sowie Freisetzungsfläche, -temperatur und -geschwindigkeit), die Lüftungsbedingungen samt weiterer Strömungseinflüsse (z.B. Maschinenabluft), der Personenaufenthalt und andere wärmeemittierende Flächen oder Körper sowie die Temperaturverhältnisse. Die relative Luftfeuchtigkeit ist von untergeordneter Bedeutung.

4. Die Höhe des Emissions-Massenstroms besitzt eine proportionale Kausalität mit Wirkung auf berechnete Konzentrationsniveaus und zeitliche Entwicklungen (beschleunigte bzw. verzögerte Konzentrationsverläufe). Mit Veränderung des Emissions-Massenstroms bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen werden charakteristische Konzentrationsverläufe qualitativ beibehalten. Die Definition des Emissions-Massenstroms muss dementsprechend sowohl in der Höhe als auch im Hinblick auf zeitabhängige Schwankungen mit den tatsächlichen Verhältnissen übereinstimmen. Bei geringen Schwankungen können geeignete Mittelwerte Einsatz finden, größere Abweichungen bedürfen einer entsprechenden Berücksichtigung.
5. Die Definition der Emissionstemperatur und -geschwindigkeit wirkt sich ggf. auf die berechnete Ausbreitungsrichtung (z.B. unmittelbare vertikale Strömung nach der Freisetzung) aus. Das Ausbreitungsmodell ermittelt die Stoffdichte bei der Emission aus dem Eingangsparameter des Molekulargewichts. Die Stoffdichte des gasförmigen Aggregatzustands als zu ermittelnder Parameter der WEA beeinflusst daher lediglich ggf. notwendige Umrechnungen zur Parametrisierung oder Auswertung der Berechnungen unmittelbar.
6. Die Verwendung äquivalenter Emissionsflächen führt zu einer Veränderung der Emissionscharakteristik. Die Parametrisierung der Emissionsfläche erfordert daher den weitgehenden Verzicht auf Äquivalenzverhältnisse bzw. -flächen, die über die Anpassung auf das Berechnungsgitter des Ausbreitungsmodells hinausgehen. Die Flächen des Berechnungsgitters müssen kleiner als die Freisetzungsfläche sein.
7. Die berechneten Konzentrationsniveaus weisen eine antiproportionale Kausalität zur Höhe der Lüftungs-Volumenströme auf. Die abgestimmte Parametrisierung durch gleichzeitige Anpassung von Zuluft- und Abluft-Volumenströmen aufeinander führt zur Verringerung von Konzentrationsschwankungen.
8. Die Berücksichtigung genau bekannter Lüftungsbedingungen ergibt stimmige Berechnungsergebnisse der Stoffkonzentrationen. Ein hoher Luftaustausch lässt zudem genauere Werte erwarten, bei geringen Volumenströmen bzw. keiner (bekannten) Raumlüftung führen kleine Abweichungen bereits zur Beeinflussung der berechneten Ausbreitungsbedingungen.
9. Ist die Abschätzung genauer Werte nicht möglich, bietet die Berücksichtigung tendenziell geringerer Lüftungsbedingungen eine Möglichkeit zur Bildung von Sicherheitsfaktoren in der Ausbreitungsrechnung, die zu höheren berechneten Stoffkonzentrationen führen.
10. Die Fläche der Lüftungsöffnungen beeinflusst bei gleichbleibendem Volumenstrom die Lüftungsgeschwindigkeiten und somit die Ausbreitungscharakteristik. Die Darstellung der Lüftungsöffnungen erfordert ebenfalls einen weitreichenden Verzicht auf Äquivalenzverhältnisse.
11. Einen (kurzfristigen) Einfluss üben ebenfalls zeitabhängige Schwankungen der Lüftungsbedingungen aus. Zeitabhängigkeiten sollten daher möglichst in der Ausbreitungsberechnung unmittelbar berücksichtigt oder mit geeigneten (Mittel-) Werten einbezogen werden.
12. Ein nachgewiesener Zusammenhang besteht zwischen der Personendarstellung und errechneten Konzentrationsschwankungen (insbesondere bei sonst niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten), der zur Stabilisierung und ortsbezogenen Angleichung des berechneten und des sich einstellenden Konzentrationsniveaus führen kann. Thermisch bedingte Umwälzungen der Raumlufte verursachen dieses Verhalten des Ausbreitungsmodells, das plausibel erscheint. Im Übrigen beeinflusst der Personenaufenthalt durch die einhergehende

- Wärmefreisetzung die berechnete Ausbreitung (z.B. durch Bildung von Auftriebsströmungen).
13. Innerhalb des Berechnungsmodells zur Stoffausbreitung stellt der Personenaufenthalt lediglich einen wärmeemittierenden Körper dar. Anderen Wärmeemittenten wird daher eine vergleichbare Möglichkeit zur Beeinflussung der Berechnungsergebnisse eingeräumt. Eine explizite Überprüfung wurde im Zuge der dargestellten Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt.
 14. Die Absolutwerte der Raumtemperaturen besitzen Einfluss auf die Konzentrationsberechnung ohne allgemeingültige Tendenzen hinsichtlich Zu- oder Abnahmen. Ebenso sind für Unterschiede zwischen den verwendeten Raum- und Zulufttemperaturen Auswirkungen auf die Konzentrations- und Temperaturverläufe nachgewiesen. Bei unbekanntem Differenzierungen bewirkt ein Abgleich der Zuluft- auf die Raumlufttemperatur eine Annäherung an Messwerte. Bei unklaren bzw. nicht genau bekannten Absolutwerten und Unterschieden erscheint daher die Annahme gleich hoher Temperaturen, ggf. in Verbindung mit mehrfachen Berechnungen (z.B. als "Sommer-" und "Winterfall"), zweckmäßig.
 15. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einflussfaktoren überdecken sich in Ausbreitungsrechnungen zum Teil gegenseitig (z.B. bei hohem Luftaustausch). Dementsprechend erfordert die Anwendung der WEA die vollständige und möglichst genaue Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Tätigkeit als Eingangswerte.
 16. Die berücksichtigten Verdunstungsmodelle nach Mackay und Matsugu und Weidlich und Gmehling weisen für die untersuchten Bedingungen große Abweichungen zwischen den Messwerten und den Berechnungsergebnissen auf. Dementsprechend ist eine Nutzung innerhalb der WEA ohne weitergehende Detailuntersuchungen nicht möglich. Das Modul zur Erfassung der Stofffreisetzung beschränkt sich daher auf Abschätzungen, die keine Berechnungen erfordern (z.B. Ableitung von Massenströmen aus Messungen oder Analogiebetrachtungen).
 17. Das Ausbreitungsmodell kann formal ebenfalls zur Abschätzung von ortsbezogenen Rahmenbedingungen (z.B. Raumlufttemperaturen oder Luftgeschwindigkeiten) genutzt werden. Da entsprechende Analysen nicht zum Umfang der Validierungsuntersuchungen gehörten, liegen für diese Verwendung keine Aussagen zur Ergebnisgenauigkeit bzw. zu möglichen Abweichungen vor.
 18. Die Analyse der im Rahmen des Ausbreitungsmodells berechneten Temperaturbedingungen auf physikalische Sinnhaftigkeit bietet für den praktischen Einsatz die Möglichkeit, Parametrisierungs- oder Berechnungsfehler zu identifizieren. Erster Ansatzpunkt einer Fehleranalyse sind die verwendeten Schnittstellen der Module der WEA, die eine Umrechnung von Parametern erfordern. Bei erkannten Fehlern (siehe Kap. 6.2.2.4, S. 112), die auf Umrechnungen beruhen, ist eine Diskussion der Auswirkungen in den Berechnungsergebnissen erforderlich.

6.3.2 Anwendungsbedingungen und Einsatzgrenzen

Aufgrund der ermittelten Validierungsaussagen (vgl. Kap. 6.3.1) besteht ein Verwendbarkeitsnachweis der WEA für Betrachtungen des Arbeitsschutzes von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen. Die Erkenntnisse zeigen auch, dass ein praktischer Einsatz nicht vollumfänglich erfolgen darf, sondern die Beachtung verschiedener Grenzen und Bedingungen notwendig macht. Diese beziehen sowohl die konzeptionelle Systematik und Anwendbarkeit der verschiedenen Module der WEA

als auch insbesondere den Einsatz und die Parametrisierung des berücksichtigten Ausbreitungsmodells FDS ein.

Die nachfolgende Aufstellung fasst die verschiedenen Anwendungsbedingungen und Einsatzgrenzen, die sich unmittelbar aus dem entwickelten Konzept und aus den Validierungsuntersuchungen ergeben, zusammen. Sie gibt konkrete Bedingungen und Vorgehensweisen für den praktischen Einsatz der WEA und im Speziellen des Ausbreitungsmodells sowie zur Abschätzung und Verwendung von Eingangsparametern an:

- I. Der betrachtete Stoff ist ein Reinstoff und mitsamt seinen Eigenschaften bekannt, wird als gasförmige Phase emittiert und breitet sich als Gas aus. Die thermodynamischen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, -druck und -feuchtigkeit) befinden sich im "Normalbereich".
- II. Die Informationsermittlung beruht auf der dargestellten Konkretisierung des Arbeitssystem-Modells, das die vollständige Erfassung der Eingangswerte sicherstellt.
- III. Die definierten Schnittstellen zwischen den Modulen erfordern die Berücksichtigung der festgelegten Faktoren zur Einheitenkonvention.
- IV. Der Emissions-Massenstrom ist in der Höhe und dem zeitlichen Verlauf genau bekannt oder kann entsprechend abgeschätzt werden.
- V. Eine Abschätzung des Emissions-Massenstroms erfolgt ohne Berechnungen (insbesondere ohne Anwendung der Verwendungsmodelle), z.B. anhand von vorbetrachtenden Messungen oder Analogiebetrachtungen. Tritt bei der Stofffreisetzung ein Phasenübergang auf, wird bei ggf. erforderlichen Umrechnungen die Stoffdichte der gasförmigen Phase herangezogen.
- VI. Die Emissionsfläche ist hinsichtlich Größe und Anordnung bekannt. Die Parametrisierung der Emissionsfläche innerhalb des Ausbreitungsmodells verzichtet auf die Bildung größerer Äquivalenzverhältnisse, die eine Anpassung auf das Berechnungsgitter übersteigt. Die Kantenlängen des Berechnungsgitters unterschreiten die Abmessungen der Emissionsfläche, so dass die Geschwindigkeitscharakteristik der Freisetzung beibehalten bleibt. Die Modellparametrisierung umfasst möglichst auch die Freisetzungstemperatur.
- VII. In das Ausbreitungsmodell gehen Zeitabhängigkeiten der Stofffreisetzung ein. Bei geringen Schwankungen pauschalisiert die Parametrisierung den Emissions-Massenstrom als geeigneten Mittelwert, größere Schwankungen sollten explizit dargestellt werden.
- VIII. Die Zu- und Abluftvolumenströme und die entsprechenden Flächen sind bekannt oder abschätzbar. Gleiches gilt für zusätzliche Strömungseinflüsse, z.B. bei Maschinenabluft. Die Eingangswerte umfassen aufeinander abgestimmte Gesamt-Volumenströme der Zu- und Abluft.
- IX. Die Abbildung der Zu- und Abluftflächen innerhalb des Ausbreitungsmodells verzichtet analog zur Emissionsfläche auf größere Äquivalenzverhältnisse.
- X. Die Lüftungsbedingungen beziehen ebenfalls größere zeitabhängige Schwankungen der Volumenströme konkret ein, wenn diese abschätzbar sind. Bei weitgehend unbekanntem Lüftungsbedingungen erfolgt die Verwendung tendenziell geringerer Werte, um Sicherheitsfaktoren in der Ausbreitungsberechnung zu bilden. Ggf. erfolgen mehrfache Berechnungen mit variierten Lüftungsbedingungen.

- XI. Die verwendete Raumtemperatur bezieht sich möglichst auf bekannte (konkrete) Werte. Die Übernahme definierter Zulufttemperaturen in die Ausbreitungsberechnung erfolgt, falls diese genau bekannt sind. Andernfalls nimmt die Parametrisierung des Ausbreitungsmodells als Zulufttemperatur die Raumlufttemperatur an. Unbekannte Temperaturen erfordern ggf. mehrfache Berechnungen mit Temperaturvariationen, z.B. als "Sommer-" und "Winterfall".
- XII. Die relative Luftfeuchtigkeit muss nicht explizit ermittelt werden, sondern wird über einen Wert von 40 % (Voreinstellung Ausbreitungsmodell) pauschal einbezogen.
- XIII. Der Personenaufenthalt (Aufenthaltsort und -dauer) sowie andere wärmeemittierende Flächen gehen in die Parametrisierung des Ausbreitungsmodells ein.
- XIV. Die Ausbreitungsbetrachtungen sind auf Konzentrationsverläufe innerhalb des Atembereichs von Personen ausgerichtet. Bei Messpunkten, die sich außerhalb des Atembereichs, aber in unmittelbarer Nähe zur Emissionsquelle befinden, ist von einer erheblichen Unterschätzung der tatsächlichen Bedingungen auszugehen. Berechnete Konzentrationen dürfen an diesen Stellen nicht als realitätsnah bewertet werden.
- XV. Die Bewertung umfasst insbesondere bei abgeschätzten Eingangsparametern geeignete Sicherheitsfaktoren, falls diese nicht bereits in die Ermittlung von Rahmenparametern eingehen. Hohe Lüftungsbedingungen begründen die Annahme zuverlässiger Konzentrationsergebnisse. Bei geringen Lüftungs-Volumenströmen muss dagegen mit Unsicherheiten und Beeinflussung bereits durch geringe Zeitabhängigkeiten gerechnet werden.
- XVI. Im Zuge einer grenzwertbasierten Bewertung werden geringe Unterschreitungen durch die Berechnungsergebnisse kritisch betrachtet, um möglichen Unsicherheiten Rechnung zu tragen.
- XVII. Die verfahrensinterne Kontrolle der physikalischen Sinnhaftigkeit der Berechnungsergebnisse bzw. die Feststellung von Berechnungsfehlern bezieht die Analyse berechneter Temperaturbedingungen ein.
- XVIII. Vorbetrachtungen zu Luftgeschwindigkeiten oder Temperaturbedingungen anhand des Ausbreitungsmodells legen ortsgenaue Messpunkte für diese Parameter an den relevanten Stellen fest.
- XIX. Der praktische Einsatz der WEA erfordert Detailkenntnisse des Anwenders zu vorgenannten Bedingungen und zur Anwendung der einbezogenen Modelle. Für eine auf andere als die in den vorliegenden Untersuchungen dargestellten Rahmenbedingungen extrapolierte Anwendung der WEA sind darüber hinaus Kenntnisse zu diesen Referenzbedingungen erforderlich. Eine Extrapolation erfordert eine detaillierte Abwägung der Verwendbarkeit der WEA durch den Anwender.

6.3.3 Praktische Einsatzmöglichkeiten

Unter Berücksichtigung der Anwendungsgrenzen bestehen für das erarbeitete Konzept der WEA verschiedene Möglichkeiten des praktischen Einsatzes. Das Verfahren entspricht den Anforderungen der GefStoffV und stellt ein Experten-Tool dar. Aus dem erforderlichen Aufwand, welchen die Informationsermittlung, die Abschätzung von Eingangsgrößen sowie die Durchführung und Auswertung der Ausbreitungsberechnungen erfordern, folgt, dass die alltägliche oder ausschließlich orientierende Anwendung zur Gefährdungsbeurteilung, z.B. von Tätigkeiten in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), nicht möglich ist.

Die WEA bietet sich aufgrund der Möglichkeit, ortsgenaue und zeitabhängige Abschätzungen zu Konzentrationsbedingungen zu erbringen, für nachstehende Detailuntersuchungen an. Grundlage der Einsatzmöglichkeiten ist, dass die erforderlichen Eingangsparameter zur Verfügung stehen und ähnliche Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen wie in den angeführten Validierungsuntersuchungen vorherrschen:

- Einzelfallbezogene Gefährdungsbeurteilungen von Tätigkeiten, deren komplexe Rahmenbedingungen den hohen Aufwand der WEA begründen. Gesichtspunkte können dabei Berechnungen von Konzentrationsverläufen entweder
 - zum Vergleich mit stoffspezifischen Grenzwerten oder
 - zur Auslegung von raumluftechnischen Maßnahmen über Vergleiche verschiedener Dimensionierungen sein.
- Einzelfallbezogene prospektive Planung von vollständigen Arbeitssystemen als ganzheitliche Nutzungskonzepte (z.B. zu Geometrie, Raumaufbau, Lüftungskonzept etc.).
- Einzelfallbezogene Rekonstruktion historischer Arbeitsbedingungen mit dem Zweck des Nachweises von Gefährdungen oder der Ableitung allgemeiner Präventionsstrategien.
- Erarbeitung arbeitsplatz- oder tätigkeitsspezifischer Maßnahmenkonzepte unter typischen Rahmenbedingungen, die z.B. Eingang in durch Inverkehrbringer aufzustellende Expositionsszenarien nach REACH, in Branchenlösungen oder in Technische Regelwerke finden. Gesichtspunkte dazu sind bspw. Vergleiche von Gesamtkonzeptionen oder die Ermittlung von Lüftungsbedingungen, die sichere Arbeitsbedingungen für Beschäftigte gewährleisten.
- Studien zu Stoffausbreitung und Strömungsbedingungen, die zum Allgemeinverständnis in definierten Fragestellungen beitragen (z.B. Untersuchungen zum Verständnis der Transportvorgänge im IPA-Expositionslabor oder zur Verbesserung der Versuchsaufbauten).
- Verdeutlichung von Stoffausbreitung und Konzentrationsbildung zur Kommunikation von Gefährdungen anhand dreidimensionaler Visualisierungen.

Kapitel 7

Fazit und Ausblick

7.1 Bewertung anhand wissenschaftlicher Hypothesen

Die vorliegende Arbeit legt entsprechend der eingangs festgelegten Methodik (vgl. Abb. 1.4) die konzeptionelle Aufstellung und Begründung der Wuppertaler Expositionsabschätzung (WEA) als rechnerisches Gesamtverfahren für die Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen dar. Die WEA geht von der methodischen Übertragung und Verwendung von Brandschutzingenieurmodellen als Berechnungsansatz zur Abschätzung der Stoffausbreitung in der Luft am Arbeitsplatz aus. Die beabsichtigte ganzheitliche Betrachtung erfordert um das Ausbreitungsmodell herum konzeptionelle Ergänzungen, die auf den Anwendungsrahmen des Arbeitsschutzes abzielen.

Zur Erläuterung und Bewertung des Forschungsergebnisses im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit werden die in Kap. 1 definierten Arbeitshypothesen herangezogen:

1. *Brandschutzingenieurmodelle, insbesondere CFD-Modelle, sind in der Lage, Aussagen über das räumliche, zeitabhängige Ausbreitungsverhalten von Gefahrstoffen in Arbeitsräumen zu treffen. Wesentliche Voraussetzung bildet die Verwendung stoffspezifischer Parameter in der grundlegenden Modellkonzeption. Eine Nutzung von Synergieeffekten unter Beachtung erforderlicher Anpassungen ist somit möglich.*

Der in Kap. 2 dargelegte Vergleich der Rahmenbedingungen des Arbeits- und des Brandschutzes zeigt auf, dass in beiden Disziplinen sicherheitsorientierte Untersuchungen zur stoffspezifischen Ausbreitung Verwendung finden. Die Unterschiede bilden einerseits die Schutzzielausrichtungen im Hinblick auf die Vermeidung bzw. Verminderung chronischer gegenüber akuter Gesundheitsschäden, andererseits die daraus folgenden relevanten Zeitdauern. Es bestehen somit eine grundsätzliche Schnittstelle und ein Interesse zur Übertragung von Brandschutzingenieurmodellen in Betrachtungen des Arbeitsschutzes.

Als methodische Voraussetzung erfordert eine Übertragung von Ausbreitungsmodellen in einen anderen Anwendungsbereich die Berücksichtigung bzw. Abbildung charakteristischer Parameter, welche z.B. Stoff- und Rahmenbedingungen als relevante Einflussgrößen charakterisieren. Die Kap. 4.2.5, 4.2.6 und 4.2.7 vergleichen die charakteristischen Parameter von für den Arbeitsschutz relevanten Stofftransportvorgängen mit den Eingangsgrößen von Brandschutzingenieurmodellen zur luftgetragenen Stoffausbreitung. Insbesondere für CFD-Modelle am Beispiel des "Fire Dynamics Simulator" (FDS) erfolgt der Nachweis, dass alle relevanten Rahmenbedingungen in den Berechnungen und durch Eingangsparameter abgebildet werden. Andere brandschutztechnische Modellansätze (Handrechenverfahren und Zonenmodelle, am Beispiel des Modells "Consolidated Model of Fire and Smoke Transport", CFAST) entsprechen den Anforderungen dagegen nicht.

Die Ergebnisse der Validierungsuntersuchungen (vgl. Kap. 6.3) verdeutlichen, dass die Nutzung des Ausbreitungsmodells FDS den formalen Voraussetzungen entspricht. Die Berechnungen führen zu Ergebnissen mit Übereinstimmung zu messtechnisch erfassten Versuchen zur Stoffausbreitung bzw. Konzentrationsbildung. Die durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen weisen insbesondere nach, dass die Genauigkeit verschiedener Eingangsgrößen (z.B. Emissionsbeschreibung und Lüftungsbedingungen) die Berechnungsergebnisse z.T. erheblich beeinflusst. Gleichzeitig führen die Untersuchungsergebnisse zu Anwendungsbedingungen und -grenzen, die bei einer synergetischen Nutzung durch den Anwender zu beachten sind.

Die konzeptionellen Überlegungen in Verbindung mit den Validierungsuntersuchungen *verifizieren die These* insofern, dass sowohl formal als auch fachlich korrekt eine Übertragung des Brandschutzingenieurmodells FDS als Anwendungsbeispiel für sog. Feldmodelle auf Arbeitsschutz-Betrachtungen zur stoff- und tätigkeitsspezifischen Ausbreitungsrechnung bei Einhaltung verschiedener Bedingungen möglich ist. Das Modell bildet somit die Grundlage für die Konzeption der WEA als Verfahren zur Gefährdungsbeurteilung. Unmittelbare Anpassungen des Ausbreitungsmodells sind nicht notwendig.

2. *Betrachtungen des Arbeits- und Brandschutzes unterscheiden sich u.a. durch gesetzliche Anforderungen, anzutreffende Umgebungsbedingungen und erforderliche Bewertungsschritte. Die Nutzung von Brandschutzingenieurmodellen zur stoffspezifischen Ausbreitungsberechnung im Arbeitsschutz erfordert daher die Verknüpfung mit weiteren Modellen, um alle Vorgänge der Stoffemission und -ausbreitung sowie die stoffliche Exposition von Beschäftigten darzustellen und zu bewerten. Aussagen über Gefährdungen für Beschäftigte ermöglicht ein daraus resultierendes Gesamtverfahren.*

Das Ausbreitungsmodell FDS erfordert eine Vielzahl notwendiger Eingangsparameter, zu deren strukturierten und vollständigen Ermittlung es einer konkret festgelegten Erfassungssystematik bedarf (vgl. Kap. 4.2.7, Kap. 5.3.2, Anhang D sowie [14, 15]). Gleichzeitig zeigt die Charakterisierung der innerhalb des Ausbreitungsmodells FDS implementierten Emissionsmodelle, dass Betrachtungen ohne Brandereignis lediglich durch strömungsmechanische Vorgaben des flächenspezifischen Emissions-Massenstroms möglich sind (vgl. Kap. 4.1.9). Das Ergebnis der Ausbreitungsberechnungen bilden zeitabhängige Konzentrationsangaben.

Die Feststellungen zur Übertragbarkeit und Implementierung des Brandschutzingenieurmodells FDS *verifizieren die aufgestellte These* unmittelbar: Die methodische Übertragung zur Ausbreitungsberechnung erfordert eine Abschätzung des flächenbezogenen Emissions-Massenstroms. Dazu eignen sich prinzipiell Emissions-Abschätzungen aus (messtechnischen) Vorbetrachtungen und Analogiebetrachtungen. Die Validierungsuntersuchungen schließen die Verwendung von Berechnungen (insbesondere Nutzung von Verdunstungsmodellen) zunächst aus (vgl. Kap. 6.3). Sofern ein Vergleich mit Grenzwerten geführt werden soll bzw. aufgrund eines vorhandenen stoffspezifischen AGW gemäß [45] erforderlich ist, besteht weiterhin die Notwendigkeit zur Ergänzung des Verfahrens um einen Bewertungsschritt im Anschluss an die Konzentrationsermittlung. Ein geschlossenes Konzept zur Gefährdungsbeurteilung benötigt zusätzlich die einheitliche Erfassung und Bereitstellung aller erforderlichen Parameter. Weiterhin ist die kritische Auseinandersetzung mit den (Zwischen-) Ergebnissen auf deren Sinnhaftigkeit mit dem Ziel durchzuführen, ggf. aufgetretene Fehler zu identifizieren.

Die Konzeption der aus diesen Anforderungen resultierenden WEA gliedert das methodisch übertragene Ausbreitungsmodell als Kernbestandteil ein. Das Verfahren unterteilt sich in Module zur Informationsermittlung, zur Ermittlung der Emission, zur Ermittlung der Stoffausbreitung und zur Bewertung der Tätigkeit sowie der Ergebnisse (vgl. Kap. 5 und Abb. 7.1). Diese Struktur entspricht den erforderlichen Ergänzungen und ermöglicht bei Beachtung verschiedener Anwendungsbedingungen durch die jeweilige Untersetzung mit verschiedenen Modellen und Methoden die Beurteilung von stoffspezifischen Gefährdungen für Beschäftigte, wie die durchge-

fürten Validierungsuntersuchungen zur Genauigkeit und Sensitivität der WEA (vgl. Kap. 6) bestätigen.

3. *Das zu entwickelnde Gesamtverfahren besitzt sowohl für die Berechnung der Stoffausbreitung als auch für die geschlossene Gesamtanwendung Validität. Der entsprechende Nachweis lässt die Ableitung von Anwendungsbedingungen und Einsatzmöglichkeiten zur Verwendung im Sinne der GefStoffV zu.*

Die in Kap. 6 durchgeführten Validierungsuntersuchungen weisen nach, dass

- das Ausbreitungsmodell für gasförmige Stoffe und unter verschiedenen Anwendungsbedingungen eine hohe Genauigkeit für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen besitzt,
- die formale Gestaltung der WEA samt der erforderlichen Schnittstellen, die Konkretisierung des Arbeitssystem-Modells zur Informationsermittlung sowie das Modul zur Bewertung von Tätigkeit und Auseinandersetzung mit Berechnungsergebnissen korrekt sind,
- die WEA jedoch als geschlossene Anwendung bei Berücksichtigung von Berechnungen zur Stofffreisetzung (insbesondere bei Einsatz der Verdunstungsmodelle) nicht valide ist.

Die Überprüfung der methodischen Annahme mit diesen Ergebnissen zeigt daher auf, dass die *These für das Ausbreitungsmodell* bei Berücksichtigung der Anwendungsbedingungen und den untersuchten Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen, *für die Module zur Informationsermittlung und zur Bewertung sowie für die Gestaltung der Schnittstellen der WEA* verifiziert werden kann. Eine unmittelbar gültige Extrapolation der Anwendbarkeit der WEA auf beliebige Rahmen- bzw. Umgebungsbedingungen ist aus sich heraus jedoch nicht möglich. Die *Falsifizierung der These* umfasst dagegen die *Verwendung von Berechnungsmodellen innerhalb des Moduls zur Ermittlung der Stoffemission*, was somit gleichermaßen für die *geschlossene Anwendung der WEA* gilt. Bei Verzicht auf die rechnerische Emissions-Abschätzung ist die These ebenfalls verifiziert.

Aus der Gegenüberstellung der formulierten Thesen mit den einzelnen Untersuchungsergebnissen folgt, dass mit der methodischen Übertragung und Implementierung des Brandschutzingenieurmodells FDS in ein Gesamtkonzept zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen und dessen Validierung das gestellte Ziel der vorliegenden Arbeit in weiten Teilen erreicht wird. In Verbindung mit den identifizierten Einschränkungen stellt das Ergebnis der Arbeit das in Abb. 7.1 aufgeführte angepasste Konzept der WEA dar, dessen Module fachlich-inhaltlich mit Methoden und Modellen untersetzt sind. Im Sinne der GefStoffV bestehen verschiedene Einsatzmöglichkeiten (vgl. Kap. 6.3.3), für die innerhalb der erarbeiteten Anwendungsgrenzen genaue Berechnungsergebnisse erwartet werden dürfen. Die Möglichkeit einer allgemeinen Anwendbarkeit darf auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen angenommen werden, ist jedoch aufgrund der Komplexität der erforderlichen Untersuchungen nicht allumfassend bzw. abschließend geklärt und erfordert daher weitere wissenschaftliche Betrachtungen.

Im Gegensatz zur ursprünglichen Konzeption (vgl. Kap. 5) nimmt das Ergebnis drei wesentliche Änderungen der WEA vor:

1. Verzicht auf einen Modellpool sowie allgemein auf Berechnungsmodelle zur Stofffreisetzung im Modul zur Erfassung der Emission;
2. daraus folgend Entfall der in Anhang E dargestellten Auswahlmatrix, die somit an dieser Stelle obsolet ist sowie
3. ergänzende Berücksichtigung eines Teilschritts zur verfahrensinternen Prüfung der Berechnungsergebnisse auf deren Sinnhaftigkeit (bspw. durch Temperatúrauswertungen und Überprüfung der Eingangsparameter) im Modul zur Bewertung.

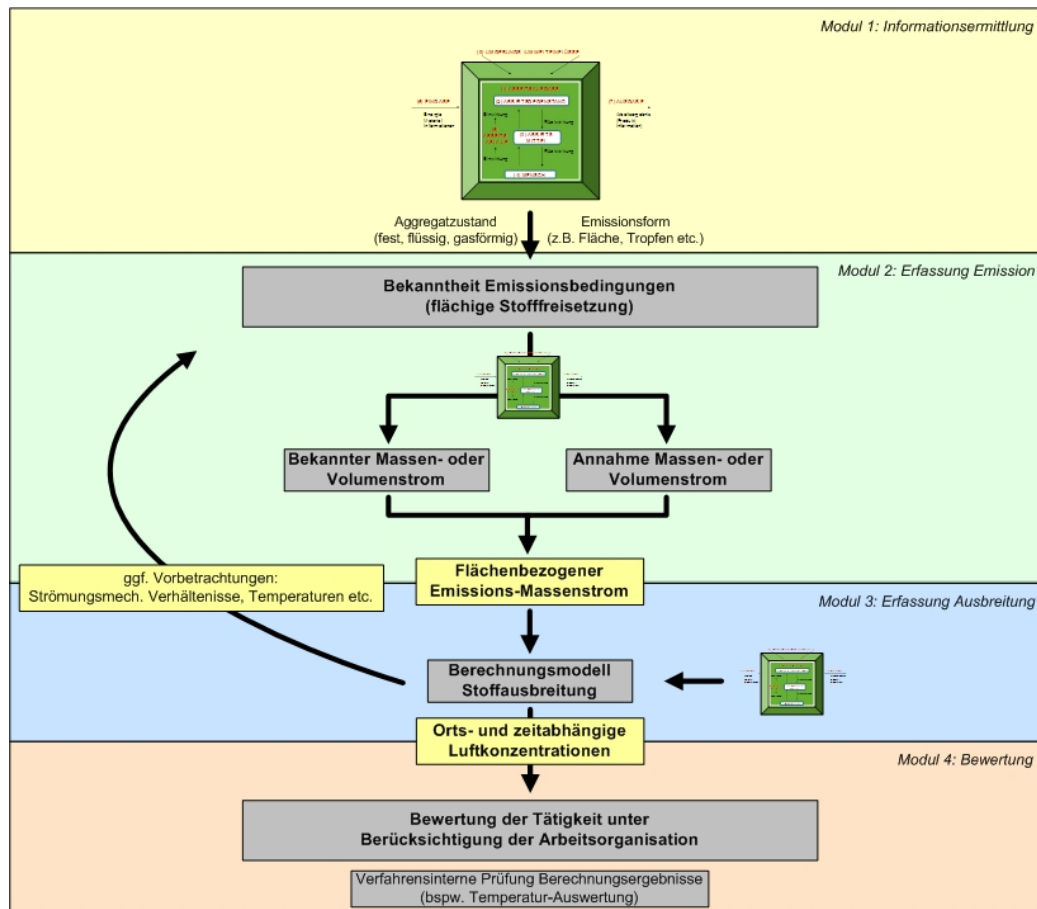


Abbildung 7.1: Angepasstes Konzept der Wuppertaler Expositions-Abschätzung [7]

7.2 Weiterführende Arbeiten und potentielle Fragestellungen

Die Wuppertaler Expositions-Abschätzung stellt einen grundlegenden konzeptionellen Ansatz zur rechnerischen Beurteilung stoffspezifischer Gefährdungen dar. Sowohl die konzeptionellen Überlegungen (vgl. Kap. 5) als auch die Ergebnisse der Validierungsuntersuchungen (vgl. Kap. 6.3) weisen nicht nur Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsbedingungen nach, sondern weisen gleichzeitig auch auf im Weiteren zu klärende Aspekte und Erweiterungsmöglichkeiten hin.

Einen Aspekt zukünftiger Forschungen bildet die Fortsetzung der begonnen Validierungsarbeiten der WEA in der in Abb. 7.1 aufgeführten Form. Im Fokus stehen dabei Arbeiten im Hinblick auf das implementierte Ausbreitungsmodell. Mögliche Zielsetzungen entsprechender Arbeiten sind dabei bspw. Untersuchungen

- zur Feststellung der Berechnungsgenauigkeit für Stoffgemische,
- zum Nachweis eines erweiterten Anwendungsbereichs (z.B. zur punktuellen Stofffreisetzung durch zweistufige Berechnungen mit verfeinerten Berechnungsgittern),
- zur Klärung der Sensitivität der Konzentrationsermittlung (z.B. für die Abschätzung von Lüftungsbedingungen und Abluft von Arbeitsmitteln oder bei Erkenntnissen zu Oberflächentemperaturen von Kleidungsgegenständen Beschäftigter und verschiedenen Arbeitsbelastungen),

- zur Überprüfung der Wiedergabe von ortsbezogenen Luftgeschwindigkeiten und Temperaturbedingungen im Zuge konzeptioneller Vorbetrachtungen,
- zur Vereinfachung der praktischen Anwendung durch Ermittlung verschiedener Wertvorgaben mit Allgemeingültigkeit oder
- zur Veränderung erbrachter Ergebnisse durch Verwendung aktualisierter Modellversionen.

Derartige Untersuchungen können einerseits als weitere, ggf. alleinstehende Forschungsvorhaben und -projekte erfolgen. Eine andere Möglichkeit für ergänzende Betrachtungen bilden wissenschaftliche Erweiterungen und Auswertungen im Rahmen des praktischen Einsatzes, in dem bspw. über die eigentliche Aufgabenstellung hinaus weitere Betrachtungsfälle (z.B. mit Veränderung von Temperaturrelationen) als qualitative Vergleiche angefügt werden.

Darüber hinaus kann der konzeptionelle Ansatz weiterer wissenschaftlicher Aktivitäten die grundlegende Erweiterung des Konzepts sein: Insbesondere steht aufgrund der in Kap. 6.2.1 festgestellten Erkenntnisse zur Validität der Verdunstungsmodelle die ergänzende Klärung möglicher Verwendungen von Berechnungsmodellen zur Stoffemission aus. Damit verbunden besteht grundsätzlich die Möglichkeit, das Modul zur Erfassung der Stoffemission um andere Ansätze zu erweitern. Neben Untersuchungen zur Anwendbarkeit und Ergebnistreue dieser Ergänzungen sowie der Auswirkungen im Rahmen der anschließenden Ausbreitungsrechnungen bildet die Festlegung entsprechender Schnittstellen einen Punkt solcher Überlegungen.

Die in dieser Arbeit dargestellten Überlegungen und Untersuchungen konzentrieren sich u.a. auf die methodische Übertragung des Brandschutzingenieurmodells FDS als synergetische Anwendung bei Arbeitsschutz-Betrachtungen. Inwiefern auch Synergieeffekte aus diesen Untersuchungen für die Anwendung dieses Modells im Brandschutz entstehen, ist dagegen nicht Gegenstand der Arbeit. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt die Untersuchung der Berechnungssystematik: Das Ausbreitungsmodell geht von verschiedenen Annahmen und Vereinfachungen zur Abbildung brandbedingter Verhältnisse aus. Die Ergebnisse umfassen keine Diskussion und Wertung, inwiefern diese Vereinfachungen bei Arbeitsschutz-Betrachtungen wirksam sind bzw. inwiefern Beeinflussungen der Berechnungsergebnisse stattfinden.

Aus diesen nicht diskutierten Gesichtspunkten resultieren ebenfalls Fragestellungen, die in weiteren Forschungsarbeiten und mit einem anders formulierten Blickwinkel auf das entwickelte Konzept zu klären sind. In diesem Zusammenhang sind bspw. Untersuchungen zur Relevanz bei niedrigerenergetischen Bränden (Wärmeemission von untergeordneter Bedeutung) oder zur Detaillierung des Modellverhaltens denkbar.

Anhang A

Tabellarische Übersichten charakteristischer Parameter

A.1 Charakteristische Parameter der strömungsmechanischen Gas-Emission

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
<i>Strömungsmechanische Größen der Einströmung:</i>			
Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit	Charakterisierung zeitlicher Emissionsverlauf als zentrale Einströmungsgröße; mitentscheidend für Volumenstrom, der in einen Raum eintritt; Einfluss auf angeschlossene Ausbreitungsvorgänge als Parameter des Impulses sowie auf Höhe der resultierenden Gesamt-Konzentration	v	m/s
Strömungsmechanischer Druck	Druckgefälle zwischen Emissionsstrom und Umgebung des Raumes für Ausbildung der Strömungsgeschwindigkeit verantwortlich; Charakterisierung des ortsabhängigen Geschwindigkeitsverlaufes, der angeschlossene Ausbreitungsvorgänge beeinflusst, dabei Abhängigkeit zur Temperatur der Emissions-Strömung	p	Pa
Gasdichte der Emission	Charakterisierung volumenbezogener Masse, die durch Strömung bewegt wird; Charakterisierung Kompressibilität des Gases sowie des erforderlichen Volumens und des resultierenden Gesamtdrucks; Beeinflussung Zusammenhang zwischen Massen- und Volumenstrom bei konstanter Emission, dabei Abhängigkeit zur Temperatur der Emissions-Strömung	ρ	kg/m^3
Temperatur der Emission	Beeinflussung der Dichte und Druckverhältnisse gasförmiger Stoffe (vgl. ideales, massebezogenes Gasgesetz [104]), ggf. Änderung der angeschlossenen Ausbreitung aufgrund temperaturbedingter Dichteänderung bzw. Ausbildung von Vorzugsrichtungen	T	K

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Charakteristik der Emissionsöffnung:			
Öffnungsfläche	Fläche, durch die Emission erfolgt (i.d.R. konstante Größe); mitbestimmend für entstehenden Volumenstrom; ggf. Rückwirkung auf Emissionsgeschwindigkeit (z.B. bei Düsenkonfiguration und konstantem Leitungsdruck) sowie Verantwortlichkeit für Ausbildung von Geschwindigkeitsgradienten über die Fläche ¹³⁰	A	m^2
Einschnürungseffekte durch Öffnungsgeometrie	Geometrisch bedingte Strömungsgeometrie an Austrittsstelle, an der sich aufgrund von Verwirbelungen (z.B. an Kanten) und Stauungen (bspw. bei Düsenkonfigurationen) Einschnürungseffekte ergeben, so dass nur ein Teil der Fläche als aerodynamisch wirksam betrachtet werden kann; Beeinflussung des resultierenden Massen- bzw. Volumenstroms sowie der entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit	c_w ¹³¹	-

Tabelle A.1: Charakteristische Parameter gasförmiger Emissionen durch Öffnungen[105]

A.2 Charakteristische Parameter der Verdunstung aus Flüssigkeitsoberflächen

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Flüssigkeitstemperatur	Beeinflussung Stoffeigenschaften: Sättigungsdampfdruck (indirekt: maximale Konzentration über der Oberfläche), Dichte; Einfluss auf Geschwindigkeit des Verdunstungsvorgangs; bei Überschreiten des Siedepunktes Übergang zur Verdampfung	T_{fl}	K
Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit	Bestimmung maximale Dampfkonzentration, die über Oberfläche ohne Abtransport erreicht werden kann; Charakterisierung generelle Neigung zur Überwindung von Bindungskräften innerhalb der Flüssigkeit; Beeinflussung Verdunstungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur	p_{evap}	Pa
Flüssigkeitsdichte	Beeinflussung Sättigungsdampfdruck bei eigener Abhängigkeit von Flüssigkeitstemperatur	ρ	kg/m^3
Partialdruck Dampf in Umgebung	Anteil Dampf am Gesamtdruck der Umgebung; Verhältnis zum Sättigungsdampfdruck für Ausprägung der Verdunstungsgeschwindigkeit mitverantwortlich	p_i	Pa
Umgebungstemperatur	Beeinflussung Sättigungskonzentration des entstehenden Dampfes über der Oberfläche (erhöhtes Aufnahmevermögen bei höheren Temperaturen)	T_∞	K
Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz ¹³²	Wärmeeintrag durch Strahlung, Konvektion und Übergang aus Behälter sowie Wärmeabfuhr (z.B. Abkühlung infolge der verlaufenden Verdunstung) für Veränderung der Flüssigkeitstemperatur (indirekt der Verdunstungsgeschwindigkeit) verantwortlich; Zusammenfassung über Energiebilanz und Bestimmung des Temperaturverlaufs	\dot{Q}	W

¹³⁰ Bei "großen" Flächen können in Abhängigkeit zur Konfiguration durch ungleichmäßige Druckverteilungen entsprechende Geschwindigkeitsprofile auftreten, die nicht gleichförmig verlaufen. Die Öffnungsfläche hat somit Einfluss auf das resultierende Strömungsbild.

¹³¹ Korrekturfaktor c_w der vorhandenen Öffnungsfläche, die aerodynamisch zur Verfügung steht, als empirisch ermitteltes Äquivalenzverhältnis.

¹³² Bilanzierung des Energieerhaltungssatzes eines Stoffes unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	Strömungsmechanische Größe des Abtransports des entstehenden Dampfes über der Flüssigkeitsoberfläche; Einfluss auf gesamte verdunstete Masse und Verdunstungsgeschwindigkeit; Einfluss auf Wärmeaustausch über Konvektion an Oberfläche	v	m/s
Überströmungslänge	Länge, über die die Strömung zum Abtransport des emittierten Stoffes geführt wird; Charakterisierung des Potentials zum angeschlossenen Stofftransport in Verbindung mit der Strömungsgeschwindigkeit (sofern Strömung in eine Raumrichtung); Beschreibung der zur Einmischung in die Strömung zur Verfügung stehenden Strecke als Einfluss auf gesamten Emissions-Massenstrom	s	m
Umgebungsdruck	Beeinflussung des Dampfdrucks und somit der entstehenden maximalen Dampfkonzentration oberhalb der Oberfläche, die sich ausbreitet (gleichzeitige Beeinflussung der maximal entstehenden Konzentration im Betrachtungsraum)	p_{∞}	Pa
Größe der Oberfläche	Fläche, auf der eine Verdunstung in Abhängigkeit zu Umgebungs- und Stoffbedingungen eintreten kann; Darstellung des möglichen Massenstroms, der flächenbezogen eintritt	A	m^2

Tabelle A.2: Charakteristische Parameter der Verdunstung aus Flüssigkeitsoberflächen [106, 107]

A.3 Charakteristische Parameter der Verdampfung aus Flüssigkeitsoberflächen

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Spezifischer Siedepunkt Flüssigkeit	Stoffspezifische Temperatur, ab der eine Verdampfung eintritt und die durch Wärmeeintrag erreicht sowie aufrecht erhalten werden muss ¹³³ ; in Verbindung mit spezifischer Wärmekapazität und Verdampfungsenthalpie signifikant für den erforderlichen Energieaufwand, bis ein Verdampfungsprozess eintritt und der zur Erhaltung der Verdampfung erforderlich ist	$T_{fl,boil}$	K
Spezifische Wärmespeicherkapazität Flüssigkeit	Charakterisierung des Energieaufwandes, der zur Erwärmung der Flüssigkeit von der Ausgangstemperatur bis zur Erreichung der Siedetemperatur (Einleitung des Verdampfungs Vorgangs) erforderlich ist; Abhängigkeit zur Flüssigkeitstemperatur	c_p	$kJ/(kg K)$
Spezifische Verdampfungsenthalpie Flüssigkeit	Stoffspezifischer Energieaufwand zur Aufrechterhaltung des Verdampfungs Vorgangs bei spezifischer Siedetemperatur; Charakterisierung des erforderlichen Wärmeeintrags der Umgebung in den Stoff; Erfassung und Beschreibung über Energiebilanz möglich	ΔH_V	kJ/kg

¹³³ Während des Verdampfungs Vorgangs bleibt die Flüssigkeitstemperatur konstant auf der Siedetemperatur, sofern ausreichend Wärme zur Aufrechterhaltung der Verdampfung zugeführt wird.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Dichte Dampf	Charakterisierung Sättigungsdampfdruck und Einfluss auf maximale Dampfkonzentration in Umgebungsluft, sofern kein strömungsbedingter Abtransport erfolgt (Beschreibung der maximalen Konzentration bei ruhenden Umgebungsbedingungen, die sich trotz anhaltender Bestrebung zur Verdampfung einstellen kann); Beeinflussung des resultierenden Massenstroms aus Oberfläche in den Raum durch Erhöhung des gleichzeitig eintretenden Kondensations-Massenstroms bei steigender Dampfdichte	ρ_{va}	kg/m^3
Stoffspezifische Dampfsättigungskonzentration bzw. Sättigungsdampfdruck	Charakterisierung maximale Konzentration des Dampfes in Umgebungsluft, sofern kein Abtransport durch Strömung oberhalb Oberfläche erfolgt (Beschreibung der maximalen Konzentration bei ruhenden Umgebungsbedingungen, die sich trotz anhaltender Bestrebung zur Verdampfung einstellen kann)	c_{Saett} bzw. p_{Saett}	kg/m^3 bzw. Pa
Umgebungstemperatur	Beschreibung Wärmeeintrag aus Umgebung in Flüssigkeit; Beeinflussung von Dampfsättigungskonzentration und -dichte	T_{∞}	K
Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	Wärmeeintrag über Strahlung, Konvektion und Übergang aus Behälterwandung sowie Wärmeabfuhren (z.B. Abkühlung infolge der verlaufenden Verdampfung) für Veränderung der Flüssigkeitstemperatur verantwortlich; Einfluss auf Beginn bzw. Ende der Verdampfung bei Erreichen oder Unterschreiten der Siedetemperatur sowie auf Verdampfungsgeschwindigkeit nach Beginn des Vorgangs; Zusammenfassung über Energiebilanz und Bestimmung des Temperaturverlaufs	\dot{Q}	W
Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	Strömungsmechanische Charakterisierung der Abfuhr des auftretenden Dampfes über Oberfläche; Einfluss auf gesamte verdampfte Stoffmasse	v	m/s
Überströmungslänge	Länge, über die die Strömung zum Abtransport des emittierten Stoffes geführt wird; Charakterisierung des Potentials zum angeschlossenen Stofftransport in Verbindung mit der Strömungsgeschwindigkeit (sofern Strömung in eine Raumrichtung); Beschreibung der zur Einmischung in die Strömung zur Verfügung stehenden Strecke; Einfluss auf gesamte emittierte Stoffmasse	s	m
Größe der Oberfläche	Fläche, aus der eine Verdampfung in Abhängigkeit zu Umgebungs- und Stoffbedingungen eintreten kann; Darstellung des möglichen Massenstroms, der flächenbezogen eintritt	A	m^2
Umgebungsdruck	Beeinflussung der Höhe der stoffspezifischen Parameter (insbesondere Siedetemperatur)	p_{∞}	Pa

Tabelle A.3: Charakteristische Parameter der Verdampfung aus Flüssigkeitsoberflächen [106, 107]

A.4 Charakteristische Parameter der Sublimation aus Feststoffoberflächen

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Stoffzusammensetzung	Einfluss auf stoffspezifische Größen (z.B. thermodynamische Parameter), die mit variierender Zusammensetzung eines Gemisches Veränderungen eingehen und sich somit ggf. anderweitige Verläufe des Phasenübergangs einstellen	—	—

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Spezifischer Sublimationsdruck	Umgebungsdruck bzw. stofflicher Partialdruck und dessen Verlauf innerhalb des sog. Phasendiagramms ¹³⁴ , bei dem in Abhängigkeit zur Temperatur eine Sublimation als stabiler Phasenübergang eintreten kann	p_{Sub}	Pa
Spezifische Sublimationstemperatur	Stofftemperatur und deren Verlauf innerhalb des Phasendiagramms, bei der in Abhängigkeit zum Druck eine Sublimation als stabiler Phasenübergang eintreten kann	T_{Sub}	K
Spezifische Sublimationsenthalpie	Gesamtenergieaufwand, der zur Überwindung der Bindungskräfte innerhalb des Feststoffes zum unmittelbaren Phasenübergang in den gasförmigen Aggregatzustand erforderlich ist ¹³⁵	ΔH_{Sub}	kJ/kg
Umgebungstemperatur	Einfluss auf Stofftemperatur (in Verbindung mit thermodynamischen Stoffeigenschaften, z.B. der spezifischen Wärmespeicherkapazität) zur Erreichung der Sublimationstemperatur bei definiertem Druck bzw. Aufbringen der erforderlichen Sublimationsenthalpie	T_{∞}	K

Tabelle A.4: Charakteristische Parameter der Sublimation aus Feststoffoberflächen [108, 109]

A.5 Charakteristische Parameter der Diffusion

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Örtlicher Konzentrationsgradient	Beeinflussung Diffusions- bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Ausprägung des Gradienten, dabei Auftreten eines Konzentrationsunterschieds als Grundvoraussetzung der Diffusion (molekulares Bestreben des Konzentrationsausgleichs über Brown'sche Molekularbewegung)	Δc	g/m^3
Spezifischer Diffusionskoeffizient	Stoff- und situationsabhängige Charakterisierung Ausbreitungsgeschwindigkeit und freier Beweglichkeit der Moleküle als Proportionalitätskonstante ¹³⁶ ; Einbeziehung Konzentrationsgradient sowie beteiligter Nebengrößen (insbesondere: Viskosität als stoffspezifische Ausbreitungsverlangsamung durch innere Reibung, Stoffdichte als Charakterisierung der Anzahl und des Abstands der Moleküle, mittlere freie Weglänge des Gastransports ¹³⁷ als Maß der freien Ausbreitungsmöglichkeit); Berücksichtigung Einfluss Umgebungsichte und -temperatur auf Wahrscheinlichkeit von Molekülkollisionen als Einwirkung auf Diffusionsgeschwindigkeit; situationsabhängige Ermittlung erforderlich (insbesondere Berücksichtigung ggf. vorhandener konvektiver Strömungen innerhalb Betrachtungsraum und konkreter Stoffzusammensetzung)	D_i	m^2/s

¹³⁴ Spezifische graphische Darstellung stabiler Aggregatzustände eines Stoffes, die in Abhängigkeit zu Stofftemperatur und -druck eintreten können.

¹³⁵ Der Gesamtenergieaufwand zum Übergang zwischen verschiedenen Phasen ist stoffspezifisch bei gleicher Temperatur und Druck konstant, dementsprechend ist die Sublimationsenthalpie gleich der Summe von Schmelz- und Verdampfungsenthalpie eines Stoffes.

¹³⁶ Konstante im Rahmen der Berechnung, die als Zusammenfassung aller gleich verbleibenden Eingangsgrößen für den betrachteten Fall verstanden wird.

¹³⁷ Mögliche Strecke des Massentransports, bis eine Kollision von Molekülen auftritt.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Emissions-Massenstrom	Beeinflussung Höhe des Konzentrationsgradienten, der sich aufgrund Diffusionsmassenstrom von Emissionsquelle weg entwickelt; Charakterisierung maximal möglicher Stoffkonzentration nach vollständigem Konzentrationsausgleich innerhalb des Raumes über gesamte Diffusionsstrecke hinweg (Einbeziehung der emittierten Stoffmasse, die sich ggf. gleichmäßig im Betrachtungsraum verbreitet)	\dot{m}	g/s
Örtlicher Gradient Stoff zu Umgebungstemperatur	Beeinflussung bzw. Verstärkung Diffusion durch minimale konvektive Strömungen (verursacht durch unterschiedliche Temperaturfelder); Ausprägung einer Vorzugsrichtung der Diffusion entsprechend thermischer Grundsätze	ΔT	K
Umgebungstemperatur	Beeinflussung Diffusionskoeffizient, der u.a. die Vorgänge der temperaturabhängigen Brownschen Molekularbewegung ¹³⁸ umschreibt	T_∞	K
Umgebungsdruck	Beeinflussung Diffusionskoeffizient bzw. der über diesen einbezogenen Stoffparameter (insbesondere Stoffdichte und Viskosität)	p_∞	Pa

Tabelle A.5: Charakteristische Parameter der Diffusion [9, 108, 110]

A.6 Charakteristische Parameter der Mitführung in Luftströmungen

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
<i>Kinematische Parameter des Strömungsfeldes</i> ¹³⁹			
Strömungsmechanische Geschwindigkeit	Geschwindigkeit, Auftritt durch Druckgefälle aufgrund externer Einflüsse; Charakterisierung des prinzipiellen Strömungsfeld-Verlaufs und u.a. Neigung zur Turbulenzbildung	v	m/s
Beschleunigung Strömung	Charakterisierung Geschwindigkeitsänderung des Hauptströmungsfeldes infolge weiterer externer Einflüsse (z.B. Störströmungen durch Abluftführung o.ä.); insbesondere Erfassung Auswirkung von Turbulenzen und des Schwerkrafteinflusses erforderlich	a	m/s^2
Wirbelstärke	Charakterisierung Strömungsfeld-Neigung zur Ausbildung von Rotationen um eigene Achse; Zusammenhang zur Viskosität der innerhalb des Strömungsfeldes transportierten Stoffe	ω	$1/s$
<i>Transporteigenschaften</i> ¹⁴⁰			
Spezifische Viskosität	Charakterisierung innere Reibung eines Strömungsfeldes in Abhängigkeit zu transportierten Stoffen, Entstehung negativer Beschleunigungen (Abbremsung der Strömungsgeschwindigkeit) und ggf. Turbulenzen	η	$kg/(m s)$
Wärmeleitung innerhalb Fluid	Charakterisierung Beeinflussung der thermodynamischen Eigenschaften (vgl. unten) durch Wärmeaustausch innerhalb Strömungsfeld sowie an Grenzflächen mit Umgebung (z.B. an Wänden); Zusammenhang zur geleisteten Wärme ¹⁴¹ und Volumenarbeit ¹⁴² innerhalb der Strömung	\dot{Q}	W

¹³⁸ Geschwindigkeitserhöhung der molekularen Geschwindigkeit mit steigender Temperatur.

¹³⁹ Prinzipielle Parameter des Strömungsfeldes, das Stofftransport bewirkt.

¹⁴⁰ Parameter zur Beschreibung des stofflichen Verhaltens innerhalb des Strömungsfeldes.

¹⁴¹ Energieumformung durch Wärmeaufnahme oder -abgabe der Stoffe, so dass Temperaturänderung der Strömung erfolgt.

¹⁴² Energieumformung durch Volumenzu- oder -abnahme.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Massendiffusion ¹⁴³	Charakterisierung Massentransport entgegen Strömungsrichtung aufgrund von Konzentrationsunterschieden, Auftritt lediglich bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten; bei Strömungen mit mehreren Komponenten: Charakterisierung Konzentrationsausgleich der Komponenten bei Gradienten innerhalb der Strömung während des Stofftransports	–	–
Emissions-Massenstrom	Charakterisierung prinzipiell möglicher Konzentrationsanstieg sowie Stoffmasse, die durch Luftströmungen transportiert werden kann	\dot{m}	g/s
Thermodynamische Parameter¹⁴⁴ von Stoffen bzw. Komponenten			
Strömungsmechanischer Druck	Charakterisierung unterschiedlicher Druckbereiche innerhalb Strömungsfeld; Beeinflussung Druckgefälle und somit Strömungsverlauf sowie dessen Geschwindigkeitsausprägung; Abhängigkeit u.a. zu Temperatur und Dichte	p	Pa
Dichte des Fluids	Charakterisierung Volumenarbeit von Komponenten innerhalb Strömungsfeld, Auswirkung auf Ausbildung von Druckgradienten; Beschreibung Schwerkräfteinfluss auf Komponenten bzw. Auftriebsverhalten; Einfluss auf Strömungsgeschwindigkeit	ρ	kg/m^3
Temperatur der Komponenten	Beeinflussung von Druck und Dichte als Zustandsgröße infolge Wärmeaustausch; Einfluss auf Strömungsgeschwindigkeit	T	K
Spezifische Enthalpie	Energieinhalt Strömungsfeld (als thermodynamisches System) als Summe aus innerer Energie und Volumenarbeit in Abhängigkeit zur Temperatur; Einfluss auf charakteristische Transporteigenschaften Strömungsfeld	h	J/kg
Entropie	Charakterisierung Wärmemenge innerhalb Strömung bzw. Wärmeeffekte (resultierend aus Energieübertragungen und -umwandlungen) sowie daraus folgender Umwandlungen innerhalb Strömung (z.B. Temperatur- oder Volumenänderung); Charakterisierung prinzipiell möglicher Ablauf von Mischungs- und Reaktionsvorgängen	s	J/kg
Spezifische Wärmespeicherkapazität	Beschreibung massenbezogener Energieaufwand zur Temperaturänderung der Komponenten (Einbringung in Strömungsfeld von außen); Zusammenhänge zu Parametern der Wärmeleitung und Temperatur	c_p bzw. c_v	$kJ/(kg K)$
Volumenausdehnungskoeffizient	Charakterisierung Volumenzu- oder -abnahme der Komponenten in Abhängigkeit zur Temperatur, somit Beschreibung Volumenarbeit als Beitrag zur Enthalpie	α	$1/K$

Tabelle A.6: Charakteristische Parameter der Stoffausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen [73, 111]

¹⁴³ Erweiterung der Diffusion (vgl. Tab. A.5) zum Auftreten innerhalb von Strömungen.

¹⁴⁴ Parameter zur Beschreibung thermodynamischer Zustände, die Fluid bzw. Komponenten innerhalb des Strömungsfeldes charakterisieren und deren Strömungsverhalten beeinflussen.

A.7 Charakteristische Parameter von Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Emissionsvorgänge

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Emissionsbedingte Parameter			
Emissions-Massenstrom	Charakterisierung in Eigenströmung transportierte Stoffmasse und maximal möglicher Konzentrationsanstieg; Beschreibung Massenstrom in Emissionsfläche, der sich mit Ausbreitung durch turbulente Einmischung vergrößert	\dot{m}	g/s
Emissions-Geschwindigkeit	Charakterisierung Strömungs-Impuls, der für Ausbildung des Kernbereichs, des abstandsabhängigen Turbulenzzustands sowie die Beeinflussung der eintretenden Einmischung von Umgebungsluft samt der räumlichen Strömungs-Entwicklung verantwortlich ist; Charakterisierung Emissions-Massenstrom in Verbindung mit Emissions-Fläche und Stoffdichte	v	m/s
Emissions-Fläche und -Geometrie	Charakterisierung Geometrie der Eigenströmung, über deren Außenflächen Lufteinmischung aus Umgebung erfolgt; Beeinflussung ortsabhängiger Massenstrom der Lufteinmischung samt räumlicher Strömungs-Entwicklung; Charakterisierung Emissions-Massenstrom in Verbindung mit Emissions-Geschwindigkeit und Stoffdichte	A	m^2
Ausrichtung Emissions-Öffnung	Strömungsbeschleunigung, -bremsung oder -ablenkung infolge Schwerkrafteinfluss in örtlicher Abhängigkeit zur Strömungsgeschwindigkeit	–	–
Stoffeigenschaften			
Dichte des Stoffes	Beeinflussung ortsbezogene Strömungsentwicklung (insbesondere Geschwindigkeitsentwicklung) sowie eintretender Turbulenzzustand, der Lufteinmischung aus Umgebung bewirkt; Charakterisierung Emissions-Massenstrom in Verbindung mit Emissions-Geschwindigkeit und -Fläche	ρ_i	kg/m^3
Temperatur des Stoffes	Beeinflussung Stoffdichte, somit Einfluss auf ortsbezogene Strömungsentwicklung sowie eintretenden Turbulenzzustand; Charakterisierung Massenstrom der einmischenden Umgebungsluft sowie der ortsbezogenen Geschwindigkeit in Abhängigkeit zum Temperaturunterschied der Umgebungsatmosphäre	T	K
Molekulargewicht Stoff	Charakterisierung Schwerkraft- und Massenträgheitseinfluss auf Strömungsbildung und -aussehen sowie auf ortsbezogene Fortentwicklung der Strömungsbedingungen	M	g/mol
Parameter der Umgebungsatmosphäre			
Dichte Umgebungsatmosphäre	Charakterisierung Geschwindigkeit und Massenstrom der Lufteinmischung aus Umgebung in Strömung sowie Beeinflussung Strömungsabbremmung in Abhängigkeit zum Dichteunterschied des Stoffes; Beeinflussung ortsbezogene Fortentwicklung der Strömung sowie der Neigung zur Turbulenzausbildung	ρ_∞	kg/m^3
Umgebungstemperatur	Beeinflussung Dichte der Umgebungsluft, somit Einfluss auf Lufteinmischung in Strömung, auf Turbulenzzustand sowie auf ortsbezogene Strömungsbildung (insbesondere Strömungsabbremmung)	T_∞	K

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Dynamische Viskosität der Umgebungsatmosphäre	Charakterisierung Turbulenz- und Mischungsverhalten Umgebungsluft an Randbereichen bzw. Grenzflächen der Strömung; Beeinflussung resultierender Massenstrom der Umgebungsluft in Strömung sowie weitertransportierter Gesamtmassenstrom	η_{∞}	$kg/(m \cdot s)$
Strömungslage der Umgebungsatmosphäre ¹⁴⁵	Beeinflussung Ausbildung und Aussehen der impulsbedingten Strömungsgeometrie durch strömungsmechanische Kräfte, die bspw. zu weiteren Verwirbelungen, Verschiebungen oder Unterdrückung samt Einfluss auf ortsbezogenen Massenstrom und Strömungsgeschwindigkeit oder Durchmischung führen; Charakterisierung mögliche Überlagerung der Eigenströmung bzw. weiterführenden Stoffausbreitung durch Strömungen innerhalb des Betrachtungsraumes, die nicht auf der Stoffemission beruhen	–	–
Resultierender Massenstrom der Umgebungsluft in Strömung	Beeinflussung Temperatur- und Geschwindigkeitsentwicklung innerhalb Eigenströmung; Einfluss auf ortsbezogene Strömungsbildung und -fortentwicklung sowie entstehenden Gesamtmassenstrom der Strömung	\dot{m}_{∞}	kg/s

Tabelle A.7: Charakteristische Parameter der Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Stoffemissionen [78, 112, 113]

A.8 Charakteristische Parameter des dichtebedingten Auf- und Abtriebs

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Molekulargewicht Stoff	Charakterisierung Stoffdichte ohne Temperatureinfluss aufgrund chemischer Zusammensetzung bzw. Struktur	M_i	g/mol
Stoffdichte	Beschreibung Stoffmasse je Volumeneinheit, die bei vorhandener Temperatur ausgefüllt wird; charakteristischer Parameter zur Einschätzung angestrebter vertikaler Stofftransport in Umgebungsatmosphäre	ρ_i	kg/m^3
Stofftemperatur	Einfluss auf Stoffdichte als temperaturbedingte Änderung oder Ursache für Stoffausbreitung	T	K
Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre	Charakterisierung spezifischer Eigenschaften der Umgebung (insbesondere Molekulargewicht und Dichte), gemittelte Parameter über Komponenten; dadurch: Abhängigkeit Referenzwerte der Umgebungsatmosphäre von enthaltenen Komponenten als "Grundbedingungen"	–	–
Molekulargewicht Umgebungsatmosphäre	Charakterisierung Dichte der Umgebungsatmosphäre ohne Temperatureinfluss aufgrund chemischer Zusammensetzung; Abschätzung des Auf- oder Abtriebs emittierter Stoffe über Vergleich der Molekulargewichte	M_{∞}	g/mol
Dichte Umgebungsatmosphäre	Beschreibung Masse je Volumeneinheit der Umgebungsatmosphäre, die bei vorhandener Umgebungstemperatur ausgefüllt wird; Abhängigkeit zur Zusammensetzung und Verteilung der Komponenten; Charakterisierung Auf- oder Abtrieb emittierter Stoffe durch Bezug der Stoffdichte auf die Umgebungsdichte	ρ_{∞}	kg/m^3
Temperatur Umgebungsatmosphäre	Einfluss auf Dichte der Umgebungsatmosphäre als temperaturbedingte Dichteänderung; Änderung vertikales Ausbreitungspotential bei Veränderung (über Dichteverhältnis)	T_{∞}	K

¹⁴⁵ Zusammenfassung des allgemeinen Strömungsbildes, das tangential zur Emissionsströmung verläuft, insbesondere der auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzen.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Formelzeichen	Einheit
Höhenabhängige Dichteveränderung Umgebungsatmosphäre	Veränderung hydrostatische Dichte der Umgebungsatmosphäre in Abhängigkeit zur Höhenlage; Anlagerung emittierter Stoff in übereinstimmendem Dichtebereich; ggf. anschließende radiale Stoffausbreitung	–	–
Emissions-Massenstrom	Charakterisierung anschließender radialer Stoffausbreitung in vertikaler Position sich entsprechender Stoff- und Umgebungsdichten, ggf. Entstehung kritischer Stoffanlagerungen; Umschreibung Ausgangspunkt und zeitlicher Konzentrationsanstieg weiterer Ausbreitungsvorgänge	\dot{m}	g/s

Tabelle A.8: Charakteristische Parameter der dichtebedingten Stoffausbreitung [79]

A.9 Charakteristische Parameter von Arbeitsraum und Tätigkeit

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses und Parameter	Formelzeichen	Einheit
Geometrische Rahmenbedingungen des Arbeitsraumes			
Äußere Abmessungen	Charakterisierung Aussehen, Ausrichtung und Gesamtvolumen des Arbeitsraumes, in dem Stoffausbreitung samt Konzentrationsbildung nach Emission erfolgt; Beschreibung über Längen, Breiten und Höhen - ggf. mit Versätzen	a b h	m
Unterzüge, Versprünge, Stützen und weitere Bauteile ¹⁴⁶	Charakterisierung von Strömungs- bzw. Ausbreitungshindernissen, die durch den Baukörper des Arbeitsraumes gebildet werden und zu Veränderungen von Strömungsfeldern (z.B. über Turbulenzen durch Umströmungen) führen können; passive Beeinflussung ohne aktive Strömungsbildung; Beschreibung über Längen, Breiten und Höhen sowie räumliche Anordnung	a_B b_B h_B	m
Betriebstechnische Einbauten ¹⁴⁷	Charakterisierung von Strömungs- bzw. Ausbreitungshindernissen, die durch (betriebstechnische) Einrichtung des Arbeitsraumes gebildet werden und zu Veränderungen von Strömungsfeldern (z.B. über Turbulenzen durch Umströmungen) führen können; passive Beeinflussung ohne aktive Strömungsbildung, wobei sich gleichzeitig strömungsmechanische Wirkungen ergeben können ¹⁴⁸ ; Beschreibung über Längen, Breiten und Höhen sowie räumliche Anordnung	a_M b_M h_M	m
Strömungsmechanische Rahmenbedingungen des Arbeitsraumes			
Lufteströmungen in den Raum	Charakterisierung von gezielten (z.B. Lüftungstechnische Maßnahmen) und ungezielten (bspw. Fensterlüftung) Luftströmungen von außen in den Arbeitsraum, die zu Veränderungen von Emission und Ausbreitung (Beeinflussung des Strömungsfeldes) führen können; Beschreibung über strömungsmechanische Parameter an Emissionsstelle, z.B. über Fläche und Geschwindigkeit, Volumenstrom, Massenstrom o.ä.	z.B. $A_{L,ein}$ $v_{L,ein}$ $V_{L,ein}$ $m_{L,ein}$	m^2 m/s m^3/s kg/s

¹⁴⁶ Einbauten, die zur tragenden Konstruktion bzw. baulichen und funktionellen Gestaltung des Arbeitsraumes gehören.

¹⁴⁷ Arbeitsmittel und Maschinen, die keine konstruktiven oder funktionellen Bauteile sind.

¹⁴⁸ Vgl. unten: Strömungsmechanische Rahmenbedingungen des Arbeitsraumes.

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses und Parameter	Formelzeichen	Einheit
Luftabführungen aus dem Raum	Charakterisierung von gezielten (z.B. über lokale Absaugungen) und ungezielten (bspw. über Dachlüftungsöffnungen) Luftabströmungen aus dem Arbeitsraum, die sowohl das Strömungsfeld beeinflussen als auch einen Abtransport von Stoffen aus dem Raum bewirken können; Beschreibung über strömungsmechanische Parameter an Abzugsöffnung, bspw. über Fläche und Geschwindigkeit, Volumenstrom, Massenstrom o.ä.	z.B. $A_{L,ab}$ $v_{L,ab}$ $V_{L,ab}$ $m_{L,ab}$	m^2 m/s m^3/s kg/s
Zu- und Abluft von Betriebsmitteln	Charakterisierung des Einflusses von Zu- und Abluftströmungen von Betriebsmitteln auf das Strömungsfeld des näheren Umfelds, der ggf. zu lokalen Turbulenzen, Ablenkungen, Überlagerungen etc. sowie Veränderungen der Stoffkonzentrationen führen kann; Beschreibung anhand strömungsmechanischer Parameter an Zu- bzw. Abluftöffnung, bspw. über Fläche und Geschwindigkeit, Volumenstrom, Massenstrom o.ä.	z.B. $A_{L,M}$ $v_{L,M}$ $V_{L,M}$ $m_{L,M}$	m^2 m/s m^3/s kg/s
Thermische Bedingungen an Betriebsmitteln	Charakterisierung des Einflusses heißer oder kalter Oberflächen von Betriebsmitteln auf das Strömungsfeld, die die ortsbezogenen thermodynamischen Zustandsgrößen (z.B. Dichte der Umgebungsluft) temperaturabhängig ändern (radiative oder konvektive Wärmeübertragung führt zu Veränderungen des allgemeinen Strömungsverhaltens); Beschreibung über Oberflächentemperatur im Verhältnis zur Umgebungstemperatur, Fläche, Emissionsgrad der Wärmestrahlung ¹⁴⁹ und charakteristischen Wärmeübergang der Konvektion ¹⁵⁰	$T_{M,Ob}$ $A_{M,Ob}$ $\varepsilon_{M,Ob}$	K m^2 –
Bewegungen von Betriebsmitteln	Charakterisierung des lokalen Einflusses bewegter Maschinenteile auf das Strömungsfeld (z.B. durch Hervorrufen von Turbulenzen und lokalen Verwirbelungen etc.); Beschreibung bspw. über Bewegungsrichtungen und -geschwindigkeiten bzw. entstehende flächenbezogene Volumen- oder Massenströme	z.B. x, y, z $v_{M,L}$ $V_{M,L}$ $m_{M,L}$	z.B. m m/s m^3/s kg/s
Wärmeemission durch Personen	Charakterisierung des Einflusses von Personen als Wärmequellen in kälterer Umgebung auf Strömungsfeld bzw. kleinskalige Strömungen des nahen Umfelds aufgrund Veränderung ortsbezogener thermodynamischer Zustandsgrößen; keine genaue bzw. schwierige statistische Erfassung von Bewegungen, ggf. Annahme des dauerhaften Aufenthalts an bestimmten Positionen (z.B. Arbeitsplätzen) erforderlich; Beschreibung über Oberflächentemperatur im Verhältnis zur Umgebungstemperatur, Fläche und Volumenanzahl, Emissionsgrad der Wärmestrahlung und charakteristischen Wärmeübergang der Konvektion	$T_{P,Ob}$ $A_{P,Ob}$ $V_{P,Ob}$ $\varepsilon_{P,Ob}$	K m^2 m^3 –
Zeitabhängige Rahmenbedingungen ortsbezogener Stoffkonzentrationen			
Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Verknüpfte Parameter	
Zeitlicher Emissionsverlauf	Charakterisierung zeitabhängige Stofffreisetzung an Umgebungsluft des Arbeitsraumes, aus der Ausbreitung samt Konzentrationsbildung resultiert; Emissionsverlauf signifikant für zeitliche Entwicklung ortsbezogener Konzentrationen sowie deren Maxima	Darstellung über zeitabhängige Größe des Emissions-Massenstroms als Emission pro Zeiteinheit	

¹⁴⁹ Wärmeanteil, der von Material als Wärmestrahlung emittiert wird, gegenüber Anteil, der absorbiert wird [114].

¹⁵⁰ Abhängigkeit zur konkreten Anordnung der Oberfläche in Relation zur Strömung sowie zu Strömungsgeschwindigkeit, so dass generelle Aussagen über Faktoren nicht möglich sind [114].

Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Verknüpfte Parameter
Zeitlicher Verlauf Lüftungstechnischer Maßnahmen	Charakterisierung zeitabhängige Beeinflussung der Stoffausbreitung infolge externer Strömungen, die aus Lüftungsverhältnissen des Arbeitsraumes resultieren; signifikant für zeitliche Veränderungen der prinzipiellen Ausbreitung (z.B. auftretende Vorgänge, Vorzugsrichtungen etc.) sowie ortsbezogener Konzentrationsmaxima	Darstellung über zeitabhängige Veränderungen der strömungsmechanischen Parameter (bspw. Strömungsgeschwindigkeit, Volumenstrom etc., vgl. Tab. A.1)
Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel	Charakterisierung zeitabhängige Beeinflussung von Ausbreitungsvorgängen durch ortsbezogene strömungsmechanisch bzw. thermisch bedingte Veränderungen, die an Aufstellorten von Betriebsmitteln resultieren; dabei: insbesondere relevant zeitabhängige Veränderungen von Zu- und Abluftströmungen, thermischen Bedingungen (z.B. Oberflächentemperaturen) und Bewegungen vorhandener Betriebsmittel, signifikant für ortsbezogene Ausbreitungsvorgänge bzw. auftretende Konzentrationen in der Nähe der Betriebsmittel (vgl. Tab. A.1)	Darstellung über zeitabhängigen Verlauf der jeweiligen charakteristischen Parameter, mit denen entsprechende Verhältnisse beschrieben werden
<i>Zeitabhängige Rahmenbedingungen der Arbeitsorganisation</i>		
Einflussfaktor	Beschreibung des Einflusses	Verknüpfte Parameter
Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten	Charakterisierung der unterschiedlichen Aufenthaltsorte von Beschäftigten innerhalb des Raumes, an denen es zu Einwirkungen durch unterschiedliche orts- und zeitbezogene Konzentrationen auf den menschlichen Organismus kommen kann; signifikant für die Einwirkung unterschiedlicher Konzentrationsverläufe von Stoffen auf Beschäftigte	Darstellung wesentlicher Aufenthaltsorte über Erfassungspunkte ortsabhängiger Stoffkonzentrationen, Berücksichtigung von Körpergröße und Position
Zeitdauern des Aufenthalts von Beschäftigten	Charakterisierung der Zeiträume, über die sich Beschäftigte an verschiedenen Aufenthaltsorten innerhalb und außerhalb des Arbeitsraumes aufhalten; signifikant für die Einwirkung unterschiedlicher Konzentrationsverläufe von Stoffen auf Beschäftigte in Verbindung mit den jeweiligen Aufenthaltsorten	Darstellung über Erfassung der Aufenthaltszeitpunkte und -dauern je Aufenthaltsort
Überschneidung von Stoffkonzentrationen und zeitabhängigen Aufenthaltsdauern Beschäftigter	Charakterisierung der zeitabhängigen, tatsächlichen Exposition von Beschäftigten in Abhängigkeit zum Aufenthaltsort; Erfassung als signifikante Kombination vorgenannter charakteristischer Parameter zur Tätigkeitsbewertung anhand Grenzwertkonzept	Darstellung durch Gegenüberstellung zeitlicher Stoffkonzentrationsverläufe mit Aufenthaltszeitpunkten und -dauern an wesentlichen Aufenthaltsorten

Tabelle A.9: Charakteristische Parameter des Arbeitsraums, der Umgebungsbedingungen und der Arbeitsorganisation

Anhang B

Vergleiche von Modell-Eingangsgrößen und charakteristischen Parametern

B.1 Modell zur Gas-Emission aus Behältern

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Druckbedingte Stoffemission von Gasen aus Behältern	v - Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit	–	Ermittlung der Geschwindigkeit aus strömungsmechanischen Grundgrößen, Möglichkeit zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit
	p - Strömungsmechanischer Druck	p - Stationärer Druck innerhalb des Betrachtungsvolumens	Direkte Entsprechung
	ρ - Gasdichte der Emission	ρ_i - Stoffdichte	Direkte Entsprechung
	T - Temperatur der Emission	γ - Isentropenexponent: Verhältnis zwischen Wärmespeicherkapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen eines Gases	Berücksichtigung der Volumenänderung durch Temperaturunterschiede
	A - Öffnungsfläche	A_{Oeff} - Öffnungsfläche in Behälter	Direkte Entsprechung
	c_w - Einschnürungseffekte durch Öffnungsgeometrie	C_D - Kontraktionskoeffizient zur Berücksichtigung von Einschnürungseffekten von Strömungen an Öffnungen	Empirische Anpassung an Öffnungstyp

Tabelle B.1: Parametervergleich zum Modell der Gas-Emission aus Behältern

B.2 Modell des Sättigungsdampfdrucks (SVP-Modell)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Verdunstung Flüssigkeit aus Oberfläche konstanter Größe ohne Unterscheidung zwischen Reinstoff und Gemisch	T_{fl} - Flüssigkeitstemperatur	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	p_{evap} - Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit	$p_{evap,i}$ - Sättigungsdampfdruck des Stoffes i	Direkte Entsprechung
	ρ - Flüssigkeitsdichte	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	p_i - Partialdruck Dampf in Umgebung	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	T_{∞} - Umgebungstemperatur	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	\dot{Q} - Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	v - Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	s - Überströmungslänge	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	p_{∞} - Umgebungsdruck	p_{atm} - Atmosphärischer Umgebungsdruck	Direkte Entsprechung
	A - Größe der Oberfläche	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters

Tabelle B.2: Parametervergleich zum SVP-Modell (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)

B.3 Modell der vollständigen Verdunstung (CEM-Modell)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Verdunstung Flüssigkeit aus Oberfläche ohne Unterscheidung zwischen Reinstoff und Gemisch	T_{fl} - Flüssigkeitstemperatur	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	p_{evap} - Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	ρ - Flüssigkeitsdichte	$\rho_{A,liq}$ - Dichte der Flüssigkeit A; M_i - Molare Masse eines Stoffes i	Direkte Entsprechung; weiterhin: Einbeziehung Molarer Masse als Umrechnungsfaktor der idealen Gasgleichung
	p_i - Partialdruck Dampf in Umgebung	V_R - Volumen des Betrachtungsraumes	Verwendung des Raumvolumens unter Annahme einer vollständigen Verdunstung; Vernachlässigung des Partialdruck-Einflusses, Skalierung auf Konzentration als Ergebniswert
	T_{∞} - Umgebungstemperatur	T - Umgebungstemperatur	Direkte Entsprechung

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	\dot{Q} - Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	v - Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	s - Überströmungslänge	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	p_∞ - Umgebungsdruck	p_{atm} - Atmosphärischer Umgebungsdruck	Direkte Entsprechung
	A - Größe der Oberfläche	$V_{A,liq}$ - Volumen der Flüssigkeit A	Darstellung der maximal möglichen Verdunstung, die über Oberfläche, jedoch unabhängig von deren Größe, erfolgt
	Eingangsgröße ohne charakteristischen Parameter	R - Allgemeine Gaskonstante	Proportionalitätskonstante des konzeptionellen Berechnungsansatzes

Tabelle B.3: Parametervergleich zum CEM-Modell (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)

B.4 Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche Reinstoff	T_{fl} - Flüssigkeitstemperatur	T_V - Verdunstungs- (bzw. Flüssigkeits-) Temperatur	Gleichgewichtstemperatur der Flüssigkeit aus Energiebilanz zwischen Umgebung und Verdunstungskühlung ¹⁵¹ , Einbindung Temperatur- und Umgebungsabhängigkeit
	p_{evap} - Sättigungsdampfdruck Flüssigkeit	$p_{evap,i}$ - Sättigungsdampfdruck Flüssigkeit i	Direkte Entsprechung
	ρ - Flüssigkeitsdichte	ρ - Stoffdichte, M_i - Molare Stoffmasse Flüssigkeit Stoffes i	Direkte Entsprechung, weiterhin: Molare Masse (verwandte Größe zur Stoffdichte) als konzeptioneller Umrechnungsfaktor
	p_i - Partialdruck Dampf in Umgebung	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters, indirekte Einbindung über Korrelationsfaktoren zu Versuchen
	T_∞ - Umgebungstemperatur	T_V - Verdunstungs- (bzw. Flüssigkeits-) Temperatur	Berücksichtigung über Beschreibung Einfluss der Umgebungstemperatur auf Flüssigkeit, indirekte Einbindung Umgebungstemperatur über Abschätzung Diffusionskoeffizient in Luft und dynamische Viskosität Umgebungsluft
	\dot{Q} - Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters; Einbindung Wärmeeintrag über Verdunstungstemperatur

¹⁵¹ Bei Temperaturen im Bereich üblicher bzw. natürlich auftretender Umgebungsbedingungen ist die Annahme als der Umgebungstemperatur entsprechend zulässig [83].

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgroßen	Soll-Ist-Vergleich
	v - Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	v_{air} - Luftgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche, $D_{i,g}$ - Diffusionskoeffizient Stoff i in Umgebungsluft	Direkte Entsprechung, weiterhin: Diffusionskoeffizient zur Einbindung der potentiellen weiteren Stoffausbreitung bzw. Abfuhr von Oberfläche
	s - Überströmungslänge	Δz - Länge Luft-Flüssigkeits-Grenzschicht in Strömungsrichtung	Direkte Entsprechung
	p_{∞} - Umgebungsdruck	p_{atm} - Atmosphärischer Umgebungsdruck (über Abschätzung des Diffusionskoeffizienten des Stoffes i in Luft)	Direkte Entsprechung
	A - Größe der Oberfläche	–	Einbindung über flächenbezogenen Emissions-Massenstrom als Ergebnisgröße
Eingangsgroßen ohne charakteristische Parameter		R - Allgemeine Gaskonstante	Proportionalitätskonstante des konzeptionellen Berechnungsansatzes
		η - Dynamische Viskosität der Umgebungsluft	Erfassung Zähigkeit der Umgebungsluft als Einfluss auf potentielles Ausbreitungsverhalten des Dampfes bzw. des Einmischungs- und Massentransportvermögens der Luftbewegung oberhalb der Oberfläche
		Korrelationsfaktoren	Konzeptionelle Anpassung der Berechnungsergebnisse auf ursprüngliche Versuche, Verknüpfung zu Umgebungs- bzw. Stofftransportbedingungen während Versuchsdurchführung

Tabelle B.4: Parametervergleich zum Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)

B.5 Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgroßen	Soll-Ist-Vergleich
Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche Reinstoff oder Stoffgemisch	T_{fl} - Flüssigkeitstemperatur	T_V - Verdunstungs- (bzw. Flüssigkeits-) Temperatur	Gleichgewichtstemperatur der Flüssigkeit aus Energiebilanz zwischen Umgebung und Verdunstungskühlung ¹⁵² , Einbindung Temperatur- und Umgebungsabhängigkeit
	p_{evap} - Sättigungsdampfdruck Flüssigkeit	$p_{evap,i}$ - Sättigungsdampfdruck Flüssigkeit i	Direkte Entsprechung
	ρ - Flüssigkeitsdichte	M_i - Molare Stoffmasse Flüssigkeit i	Berücksichtigung verwandter Größe der molaren Masse, somit Vernachlässigung des Temperatureinflusses

¹⁵² Bei Temperaturen im Bereich üblicher bzw. natürlich auftretender Umgebungsbedingungen ist die Annahme als der Umgebungstemperatur entsprechend zulässig [83].

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	p_i - Partialdruck Dampf in Umgebung	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters, indirekte Einbindung über Korrelationsfaktoren zu Versuchen
	T_∞ - Umgebungstemperatur	T_V - Verdunstungs- (bzw. Flüssigkeits-) Temperatur	Berücksichtigung über Beschreibung Einfluss der Umgebungstemperatur auf Flüssigkeit, indirekte Einbindung Umgebungstemperatur über Abschätzung Diffusionskoeffizient in Luft
	\dot{Q} - Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters; Einbindung Wärmeeintrag über Verdunstungstemperatur
	v - Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	v_{air} - Luftgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche, $D_{i,g}$ - Diffusionskoeffizient Stoff i in Umgebungsluft	Direkte Entsprechung; weiterhin: Diffusionskoeffizient zur Einbindung der potentiellen weiteren Stoffausbreitung bzw. Abfuhr von Oberfläche
	s - Überströmungslänge	X - Länge Flüssigkeitsoberfläche	Direkte Entsprechung
	p_∞ - Umgebungsdruck	–	indirekte Einbindung Umgebungsdruck über Abschätzung des Diffusionskoeffizienten in Luft
	A - Größe der Oberfläche	A_i - Oberfläche Flüssigkeit i	Direkte Entsprechung
Eingangsgrößen ohne charakteristische Parameter		R - Allgemeine Gaskonstante	Proportionalitätskonstante des konzeptionellen Berechnungsansatzes
		x_i - Molenbruch Komponente i in Flüssigkeit	Einbindung zur Ausrichtung der rechnerischen Betrachtung auf einzelne Gemischkomponenten, Charakterisierung Veränderung des Sättigungsdampfdrucks aufgrund Gemischkonzentration in Flüssigkeit
		γ_i - Aktivitätskoeffizient Komponente i in Flüssigkeit	Einbindung zur Ausrichtung der rechnerischen Betrachtung auf einzelne Gemischkomponenten, Faktor zur Charakterisierung Veränderung des Sättigungsdampfdrucks aufgrund Gemischkonzentration in Flüssigkeit ¹⁵³
		ν - Kinematische Viskosität Umgebungsluft	Erfassung Zähigkeit der Umgebungsluft als Einfluss auf potentielles Ausbreitungsverhalten des Dampfes bzw. des Einmischungs- und Massentransportvermögens der Luftbewegung oberhalb der Oberfläche, dabei Berücksichtigung des Temperatureinflusses über Stoffdichte

¹⁵³ Für Reinstoffe ergibt sich keine Änderung des Sättigungsdampfdrucks, γ_i ist in diesem Fall gleich "1" zu setzen [83].

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
		Korrelationsfaktoren	Konzeptionelle Anpassung der Berechnungsergebnisse auf ursprüngliche Versuche, Verknüpfung zu Umgebungs- bzw. Stofftransportbedingungen während Versuchsdurchführung

Tabelle B.5: Parametervergleich zum Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)

B.6 Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Verdampfung aus Flüssigkeitsoberflächen nach Überschreitung des Siedepunkts durch die Flüssigkeitstemperatur	$T_{fl,boil}$ - Spezifische Siedetemperatur Flüssigkeit	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	c_p - Spezifische Wärmespeicherkapazität Flüssigkeit	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	ΔH_V - Spezifische Verdampfungsenthalpie Flüssigkeit	Δh_c - Verdampfungsenthalpie	Direkte Entsprechung
	ρ_{va} - Dichte Dampf	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	c_{Saett} bzw. p_{Saett} - Stoffspezifische Dampfsättigungskonzentration bzw. Sättigungsdampfdruck	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	T_∞ - Umgebungstemperatur	$\dot{Q}_\infty(t)$ - Zeitabhängige Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche	Teilbetrachtung der Wärmeübertragung durch Umgebungstemperatur auf Stoff berücksichtigt
	\dot{Q} - Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Wärmebilanz	$\dot{Q}_\infty(t)$ - Zeitabhängige Wärmestromdichte auf Oberfläche	Direkte Entsprechung
	v - Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	s - Überströmungslänge	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	A - Größe der Oberfläche	A_i - Oberfläche Flüssigkeit i	Direkte Entsprechung
Sublimation aus Feststoffen	$[-]$ Stoffzusammensetzung	–	Indirekter Bezug durch Verwendung der gemischspezifischen Sublimationsenthalpie
	p_{Sub} - Spezifischer Sublimationsdruck	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	T_{Sub} - Spezifische Sublimationstemperatur	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	ΔH_{Sub} - Spezifische Sublimationsenthalpie	Δh_{Sub} - Sublimationsenthalpie	Direkte Entsprechung
	T_{∞} - Umgebungstemperatur	$\dot{Q}_{\infty}(t)$ - Zeitabhängige Wärmestromdichte auf Oberfläche	Teilbetrachtung der Wärmeübertragung durch Umgebungstemperatur auf Stoff berücksichtigt

Tabelle B.6: Parametervergleich zum theoretischen Verdampfungs- und Sublimationsmodell (Verdampfung aus Flüssigkeitsoberfläche bzw. Sublimation)

B.7 Diffusionsmodell

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich	
(Turbulente) Diffusion	Δc - Örtlicher Konzentrationsgradient	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters, Erfassung Einfluss über Abstand zum Emissionspunkt und Zeitdauer (potentieller Konzentrationsausgleich)	
	D_i - Spezifischer Diffusionskoeffizient	D_i - Diffusionskoeffizient Stoff i in Umgebungsluft	Direkte Entsprechung	
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	$m_i, Diff$ - Emissions-Massenstrom diffundierender Stoff	Direkte Entsprechung	
	ΔT - Örtlicher Gradient zwischen Stoff- und Umgebungstemperatur	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters	
	T_{∞} - Umgebungstemperatur	T - Umgebungstemperatur (über Abschätzung des Diffusionskoeffizienten des Stoffes i in Luft)	Direkte Entsprechung	
	p_{∞} - Umgebungsdruck	p_{atm} - Umgebungsdruck (über Abschätzung des Diffusionskoeffizienten des Stoffes i in Luft)	Direkte Entsprechung	
	Eingangsgrößen ohne charakteristische Parameter	r - Betrachtungsabstand Diffusion zu Emissionspunkt		Konzeptionelle Berücksichtigung des fortschreitenden Konzentrationsausgleichs in Verbindung mit Betrachtungsdauer
		t - Zeit		Konzeptionelle Berücksichtigung des fortschreitenden Konzentrationsausgleichs in Verbindung mit Abstand zum Emissionspunkt
M - Molare Stoffmasse (über Abschätzung des Diffusionskoeffizienten des Stoffes i in Luft)			Konzeptionelle Skalierung des Dichteverhältnisses in Bezug zur Umgebungsluft als Einfluss auf Diffusionspotential	

Tabelle B.7: Parametervergleich zum Diffusionsmodell (Stoffausbreitung durch Diffusion)

B.8 Zonenmodelle des Arbeitsschutzes

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgroßen	Soll-Ist-Vergleich
Ausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen	v - Strömungsgeschwindigkeit	λ_R - Luftwechsellzahl Betrachtungsraum, \dot{V}_{air} - Volumenstrom Zu- bzw. Abluft Betrachtungsraum, $\dot{V}_{air,NF}$ - Volumenstrom Luftaustausch der Kontrollvolumen (Quellterm)	Konzeptionelle Abschätzung der Strömungsbedingungen zwischen Kontrollvolumen bzw. äußerer Umgebung und Betrachtungsraum ohne ortsbezogene Auflösung der Strömung
	a - Beschleunigung der Strömung	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	ω - Wirbelstärke	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	η - Spezifische Viskosität	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	\bar{Q} - Wärmeleitung innerhalb Fluid	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	[–] Massendiffusion	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	$\dot{m}_{i,Em}$ - Emissions-Massenstrom Stoff i	Direkte Entsprechung
	p - Strömungsmechanischer Druck	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	ρ - Dichte des Fluids	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	T - Temperatur der Komponenten	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	h - Spezifische Enthalpie	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	s - Entropie	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	c_p bzw. c_v - Spezifische Wärmespeicherkapazität	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	α - Volumenausdehnungskoeffizient	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
	Eingangsgroßen ohne charakteristische Parameter	t_0 - Zeitpunkt Emissionsbeginn	
t_1 - Betrachtungszeitpunkt			Konzeptionelle Erfassung des gesamten Luftaustauschs zwischen Kontrollvolumen bzw. Betrachtungsraum und Umgebung

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
		V_K - Größe der Kontrollvolumen	Konzeptionelle Berücksichtigung zur Ermittlung von Quelltermen, die Massenaustausch zwischen Kontrollvolumen sowie der Umgebung umschreiben ¹⁵⁴
		$x_{i,ex}$ - Anfangskonzentration Stoff i in Umgebungsluft	Konzeptionelle Erfassung der stoffbezogenen Grundbelastung des Betrachtungsraums ohne weitere Stoffausbreitung

Tabelle B.8: Parametervergleich zu arbeitsschutzbezogenen Zonenmodellen (Ausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen)

B.9 Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Emissionen	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung, da Einführung als Nebenbetrachtung erforderlich
	v - Emissions-Geschwindigkeit	v_0 - Strömungsgeschwindigkeit Emission	Direkte Entsprechung
	A - Emissions-Fläche und -Geometrie	d - Durchmesser Emissionsdüse, m - Mischzahl	Direkte Entsprechung des Flächenbezugs über verwandte Größe; konzeptionelle Berücksichtigung geometrischer Bedingungen über Konzept der semi-empirischen, öffnungsspezifischen Mischzahl
	[–] Ausrichtung Emissions-Öffnung	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Fallunterscheidung des abgeleiteten Formelwerks
	ρ_i - Dichte des Stoffes	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters, indirekter Einbezug über Molekulargewicht des Stoffes
	T - Temperatur der Komponente	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Fallunterscheidung des abgeleiteten Formelwerks
	M - Molekulargewicht Stoff oder Komponente	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Fallunterscheidung des abgeleiteten Formelwerks in Verbindung mit Relation des thermisch beeinflussten Strömungsverhaltens
	ρ_∞ - Dichte Umgebungsatmosphäre	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters
T_∞ - Umgebungstemperatur	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Fallunterscheidung abgeleitetes Formelwerk	

¹⁵⁴ Eine unmittelbare Darstellung der Eingangsgröße erfolgt nicht in den Formulierungen der Zonenmodelle. Die Größe der Kontrollvolumen wird als sekundärer Parameter für die Ermittlung der Berechnungsgrößen, bspw. zur Ermittlung des Volumenstroms zwischen den Kontrollvolumen (über die Hüllfläche) mitsamt weiterer Parameter erforderlich.

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich	
	η_∞ - Dynamische Viskosität der Umgebungsatmosphäre	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters	
	[–] Strömungslage der Umgebungsatmosphäre	–	Keine konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters	
	m_∞ - Resultierender Massenstrom der Umgebungsluft in Strömung	–	Keine unmittelbare konzeptionelle Berücksichtigung des charakteristischen Parameters; Einbindung über generelle Ableitung und Fallunterscheidung des Formelwerks sowie durch Einbeziehung der semi-empirischen Mischzahl m	
	Eingangsgrößen ohne charakteristischen Parameter	v_x - Strömungsgeschwindigkeit in Freistrahlmittelachse		Konzeptionelle Größe als Zwischenwert zur Berechnung des ortsbezogenen Volumenstroms \dot{V}_x im Abstand x zur Emissionsöffnung
		x_0 - Kernlänge Freistrahls		Konzeptionelle Berücksichtigung des Impulseinflusses auf die fortschreitende Geschwindigkeits- und Volumenstromänderung des Freistrahls
		x - Abstand Betrachtungspunkt zu Emissionspunkt auf Freistrahlmittelachse		Konzeptionelle Berücksichtigung der fortschreitenden Geschwindigkeits- und Volumenstromänderung des Freistrahls
		Ar - Archimedes-Zahl		Konzeptionelle Berücksichtigung der Aufrechterhaltung des Impulses als Ausdruck von Auftriebskraft gegenüber innerer Fluidreibung
\dot{V}_{em} - Emissions-Volumenstrom		Konzeptionelle Berücksichtigung der Volumenstromänderung mit fortschreitendem Freistrahls durch Einmischung Umgebungsluft		

Tabelle B.9: Parametervergleich zu Strahlgesetzen (Eigenströmung infolge impulsbehafteter Emission)

B.10 Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
Abschätzung der dichtebedingten, vertikalen Schichtung gasförmiger Stoffe	M_i - Molekulargewicht Stoff	–	Konzeptionelle Abschätzung über Stoffdichte (verwandte Größe unter Einbeziehung Temperaturabhängigkeit)
	ρ_i - Stoffdichte	ρ_i - Stoffdichte	Direkte Entsprechung
	T - Stofftemperatur	T_i - Temperatur Stoff i	Direkte Entsprechung
	[–] Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre	–	Keine unmittelbare konzeptionelle Berücksichtigung, Einbeziehung in Ermittlung temperaturabhängige Dichte der Umgebungsluft
	M_∞ - Molekulargewicht Umgebungsatmosphäre	–	Konzeptionelle Abschätzung über Dichte der Umgebungsatmosphäre (verwandte Größe unter Einbeziehung Temperaturabhängigkeit)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	ρ_∞ - Dichte Umgebungsatmosphäre	ρ_∞ - Dichte Umgebungsluft	Direkte Entsprechung
	T_∞ - Temperatur Umgebungsatmosphäre	T_∞ - Temperatur Umgebungsluft	Direkte Entsprechung
	[–] Höhenabhängige Dichteveränderung Umgebungsatmosphäre	–	Keine unmittelbare konzeptionelle Berücksichtigung; Einbeziehung über Randbetrachtung bzw. mehrfache Verwendung des Eingangsparameters der Temperatur der Umgebungsluft in verschiedenen Höhenlagen möglich
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	\dot{m}_i - Emissions-Massenstrom Stoff i	Direkte Entsprechung

Tabelle B.10: Parametervergleich zur Abschätzung der dichtebedingten, vertikalen Schichtung gasförmiger Stoffe (Dichtebedingter Auf- oder Abtrieb)

B.11 Stoffbezogenes Ausbreitungsmodell des Brandschutzingenieurmodells FDS (Feldmodell)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
(Turbulente) Diffusion	Δc - Örtlicher Konzentrationsgradient	–	Konzeptionelle Ableitung aus ortsbezogener Konzentrationsberechnung (Vergleich benachbarter Kontrollvolumen)
	D_i - Spezifischer Diffusionskoeffizient	<code>SPEC:DIFFUSIVITY</code> Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient in Umgebungsatmosphäre	Direkte Entsprechung
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	<code>SURF:MASS_FLUX_TOTAL</code> Flächenbezogener Gesamt-Massenstrom aus Öffnungsfläche <code>SURF:MASS_FLUX (I)</code> Flächenbezogener Massenstrom Komponente i aus Öffnungsfläche <code>SURF:XYZ</code> Größe der Öffnungsfläche <code>SURF:VEL</code> Strömungsgeschwindigkeit in Flächennormale	Konzeptionelle Erfassung der Emission über strömungsmechanische Parameter
	ΔT - Örtlicher Gradient zwischen Stoff- und Umgebungstemperatur	–	Konzeptionelle Ableitung aus ortsbezogener Ausbreitungsberechnung (Vergleich zwischen Stoff- und Umgebungstemperatur)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	T_∞ - Umgebungstemperatur	MISC:TMPA Temperatur Umgebungsatmosphäre bzw. INIT:TEMPERATURE Temperatur Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung
	p_∞ - Umgebungsdruck	MISC:P_INF Globaler Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum	Direkte Entsprechung
Abschätzung dichtebedingte, vertikale Stoffschichtung von Gasen	M_i - Molekulargewicht Stoff oder Komponente	SPEC:MW Molekulargewicht Stoff oder Komponente	Direkte Entsprechung
	ρ_i - Stoffdichte	–	Konzeptionelle Berücksichtigung durch Bezug auf stoffspezifisches Molekulargewicht; Berücksichtigung Einfluss lokaler Temperaturen
	T - Temperatur emittierte Komponente	SURF:TMP_FRONT Stofftemperatur in Emissionsöffnung	Direkte Entsprechung
	[–] Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre	INIT:MASS_FRACTION (N) Massenanteil Stoff in Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung
	M_∞ - Molekulargewicht Umgebungsatmosphäre	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Massenanteile von Stoffen in der Umgebungsatmosphäre ¹⁵⁵ samt entsprechender Molekulargewichte (Berücksichtigung über programmatische, anteilbezogene Mittelung)
	ρ_∞ - Dichte Umgebungsatmosphäre	INIT:DENSITY Dichte Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung
	T_∞ - Temperatur Umgebungsatmosphäre	MISC:TMPA Temperatur Umgebungsatmosphäre bzw. INIT:TEMPERATURE Temperatur Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung
	[–] Höhenabhängige Dichteänderung Umgebungsatmosphäre	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Referenzbezug auf Bodenniveau des Berechnungsfelds; dabei: Berücksichtigung Temperatureinfluss und Höhe durch Lösung allgemeiner Navier-Stokes-Gleichungen (Beachtung Massen- und Energieerhaltung)

¹⁵⁵ Ohne Definition weiterer Massenanteile wird als Umgebungsatmosphäre Luft mit einem Molekulargewicht von 29,0 g/mol angenommen.

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	<code>SURF:MASS_FLUX</code> <code>_TOTAL</code> Flächenbezogener Gesamt-Massenstrom aus Öffnungsfläche <code>SURF:MASS_FLUX (I)</code> Flächenbezogener Massenstrom Komponente i aus Öffnungsfläche <code>SURF:XYZ</code> Größe der Öffnungsfläche <code>SURF:VEL</code> Strömungsgeschwindigkeit in Flächennormale	Konzeptionelle Erfassung der Emission über strömungsmechanische Parameter
Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Emissionen	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	<code>SURF:MASS_FLUX</code> <code>_TOTAL</code> Flächenbezogener Gesamt-Massenstrom aus Öffnungsfläche <code>SURF:MASS_FLUX (I)</code> Flächenbezogener Massenstrom Komponente i aus Öffnungsfläche <code>SURF:XYZ</code> Größe der Öffnungsfläche <code>SURF:VEL</code> Strömungsgeschwindigkeit in Flächennormale	Konzeptionelle Erfassung der Emission über strömungsmechanische Parameter
	v - Emissions-Geschwindigkeit	<code>SURF:VEL</code> Strömungsgeschwindigkeit in Flächennormale	Direkte Entsprechung
	A - Emissions-Fläche und -Geometrie	<code>SURF:XYZ</code> Größe Öffnungsfläche	Direkte Entsprechung
	$[-]$ Ausrichtung Emissions-Öffnung	<code>SURF:XYZ</code> Geometrische Anordnung Öffnungsfläche ¹⁵⁶	Konzeptionelle Berücksichtigung über räumliche Anordnung der Öffnungsfläche
	ρ_i - Stoffdichte	–	Konzeptionelle Berücksichtigung durch Bezug auf stoffspezifisches Molekulargewicht
	T - Temperatur der Komponente	<code>SURF:TMP_FRONT</code> Stofftemperatur in Emissionsöffnung	Direkte Entsprechung
	M - Molekulargewicht Stoff oder Komponente	<code>SPEC:MW</code> Molekulargewicht Stoff oder Komponente	Direkte Entsprechung
	ρ_∞ - Dichte Umgebungsatmosphäre	<code>INIT:DENSITY</code> Dichte Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung

¹⁵⁶ Der Befehl dient der Definition von Koordinaten, über die eine Öffnung aufgespannt wird. Somit wird gleichzeitig sowohl die Position als auch die Ausrichtung definiert.

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	T_∞ - Umgebungstemperatur	MISC:TMPA Temperatur Umgebungsatmosphäre bzw. INIT:TEMPERATURE Temperatur Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung	Direkte Entsprechung
	η_∞ - Dynamische Viskosität Umgebungsatmosphäre	SPEC:VISCOSITY Dynamische Viskosität Stoff oder Komponente	Konzeptionelle Zuordnung über Definition von Massenanteilen der Umgebungsatmosphäre
	[–] Strömungslage Umgebungsatmosphäre	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über allgemeine Ermittlung der strömungsmechanischen Bedingungen innerhalb des Betrachtungsraumes durch ortsbezogene Lösung Navier-Stokes-Gleichungen je Kontrollvolumen (allgemeine strömungsmechanische Ausbreitungsrechnung)
	m_∞ - Resultierender Massenstrom Umgebungsluft in Strömung	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über "freie" Berechnung der strömungsmechanischen Bedingungen innerhalb des Betrachtungsraumes durch ortsbezogene Lösung Navier-Stokes-Gleichungen je Kontrollvolumen (allgemein strömungsmechanische Ausbreitungsrechnung ohne phänomenologische, empirische Anpassung)
Ausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen	v - Strömungsgeschwindigkeit	u, v, w Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit (dreidimensionale Abbildung der Raumrichtungen)	Konzeptionelle ortsbezogene Berechnung strömungsmechanische Bedingungen durch Navier-Stokes-Gleichungen als zeitabhängiger Ausdruck
	a - Beschleunigung Strömung	$\nabla u, \nabla v, \nabla w$ Orts- und zeitabhängige Änderung dreidimensionale Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit	Konzeptionelle ortsbezogene Berechnung strömungsmechanische Bedingungen durch Navier-Stokes-Gleichungen als zeitabhängiger Ausdruck richtungsabhängiger Beschleunigungen
	ω - Wirbelstärke	–	Konzeptionelle ortsbezogene Berechnung strömungsmechanische Bedingungen durch Navier-Stokes-Gleichungen als zeitabhängiger Ausdruck des Strömungsverlaufs; dabei: Berücksichtigung des Large-Eddy-Simulation-Ansatzes (LES) zur Erfassung des Einflusses kleinskaliger Turbulenzen [73]
	η - Spezifische Viskosität	SPEC:VISCOSITY Dynamische Viskosität Stoff oder Komponente	Modellbasierte Zuordnung durch Massenanteile in Umgebungsatmosphäre; dabei konzeptionelle Erhöhung der Viskosität zur Abbildung des Turbulenzeinflusses ¹⁵⁷

¹⁵⁷ Die Viskosität bildet den Ansatzpunkt der LES-Berechnungssystematik (vgl. [11, 73]), über die der Einfluss kleinskaliger Verwirbelungen auf die Entwicklung des strömungsmechanischen Verhaltens projiziert wird.

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	\dot{Q} - Wärmeleitung innerhalb Fluid	<code>SPEC:CONDUCTIVITY</code> Spezifische Wärmeleitfähigkeit Stoff oder Komponente	Konzeptionelle Zuordnung durch Definition Massenanteile in Umgebungsatmosphäre; konzeptionelle Erfassung innerhalb ortsbezogener Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen zur Bestimmung strömungsmechanischer Bedingungen unter Beachtung der Beeinflussung durch Wärmetransport bzw. Energieerhaltung
	[–] Massendiffusion	<code>SPEC:DIFFUSIVITY</code> Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient in Umgebungsatmosphäre	Konzeptionelle Berücksichtigung durch ortsbezogene Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen unter Beachtung der Massenerhaltung; dabei Berücksichtigung des Diffusionsverhaltens zwischen benachbarten Kontrollvolumen aufgrund ermittelter, zeitabhängiger Konzentrationsunterschiede
	\dot{m} - Emissions-Massenstrom	<code>SURF:MASS_FLUX_TOTAL</code> Flächenbezogener Gesamt-Massenstrom aus Öffnungsfläche <code>SURF:MASS_FLUX (I)</code> Flächenbezogener Massenstrom Komponente i aus Öffnungsfläche <code>SURF:XYZ</code> Größe der Öffnungsfläche <code>SURF:VEL</code> Strömungsgeschwindigkeit in Flächennormale	Konzeptionelle Erfassung der Emission über strömungsmechanische Parameter
	p - Strömungsmechanischer Druck	p Orts- und zeitabhängiger strömungsmechanischer Druck	Konzeptionelle ortsbezogene Berechnung strömungsmechanischer Bedingungen durch Navier-Stokes-Gleichungen als zeitabhängiger Ausdruck
	ρ - Dichte des Fluids	–	Konzeptionelle Berücksichtigung durch Bezug auf stoffspezifisches Molekulargewicht bzw. unmittelbare Ermittlung als strömungsmechanischer Parameter der Algorithmen
	T - Temperatur der Komponenten	<code>SURF:TMPFRONT</code> Temperatur der Strömung in Emissionsöffnung	Konzeptionelle Berücksichtigung zur Lösung Navier-Stokes-Gleichungen zur ortsbezogenen Berechnung strömungsmechanischer Bedingungen (je Kontrollvolumen, Berücksichtigung Energieerhaltung)

Berücksichtigte physikalische Vorgänge	Charakteristische Parameter	Modellspezifische Eingangsgrößen	Soll-Ist-Vergleich
	h - Spezifische Enthalpie	SPEC : SPECIFIC _ENTHALPY Stoffspezifische Enthalpie, SPEC : REFERENCE _TEMPERATURE Referenztemperatur der stoffspezifischen Enthalpie und Wärmespeicherkapazität	Konzeptionelle Verwendung zur Abbildung des Wärmetransports innerhalb der Strömung bei Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen
	s - Entropie	–	Konzeptionelle Berücksichtigung durch Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen
	c_p bzw. c_v - Spezifische Wärmespeicherkapazität	SPEC : SPECIFIC_HEAT Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität, SPEC : REFERENCE _TEMPERATURE Referenztemperatur der stoffspezifischen Enthalpie und Wärmespeicherkapazität	Direkte Entsprechung
	α - Volumenausdehnungskoeffizient	–	Konzeptionelle Berücksichtigung über Lösung Navier-Stokes-Gleichungen

Tabelle B.11: Parametervergleich zum stoffbezogenen Ausbreitungsmodell des Brandschutzingenieurmodells FDS

B.12 Modell des Arbeitssystems zur Strukturierung und Informationsermittlung

Parameter	Arbeitssystemelement
<i>Eingangsgroßen der Emissionsmodelle:</i>	
Flächenbezogener Emissions-Volumen- bzw. Massenstrom gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen); ggf. Unterscheidung in Gesamtwert und stoff- bzw. komponentenbezogener Wert einer Strömung	Arbeitsgegenstand
Emissions-Strömungsgeschwindigkeit in Normalrichtung (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	Arbeitsgegenstand
Emissions- bzw. Öffnungsfläche (Behälteröffnung bzw. Grenzfläche des Phasenübergangs)	Arbeitsgegenstand
Länge Emissionsfläche in Strömungsrichtung (Emission durch flächenbezogene Verdunstung)	Arbeitsgegenstand
Kontraktionskoeffizient Behälteröffnung	Arbeitsgegenstand
Stationärer Druck innerhalb Behälter	Arbeitsgegenstand
Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente	Eingabe
Molenbruch der Komponenten (Charakterisierung der Zusammensetzung von Flüssigkeits-Gemischen)	Eingabe
Stoffdichte bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)	Eingabe
Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als unmittelbare Annahme)	Eingabe
Temperatur der Flüssigkeit (Temperatur vor Phasenübergang, ggf. mit Zeitabhängigkeit als unmittelbare Annahme oder rechnerische Ableitung)	Eingabe

Parameter	Arbeitssystemelement
Sättigungsdampfdruck des Stoffes	Eingabe
Dampfdruck Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre (ggf. unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit)	Eingabe
Verdunstungstemperatur von Flüssigkeiten	Eingabe
Stoffspezifische Verdampfungsenthalpie (ggf. unter Berücksichtigung Zeitabhängigkeit)	Eingabe
Stoffspezifische Sublimationsenthalpie	Eingabe
Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre	Eingabe
Empirischer, stoffspezifischer Aktivitätskoeffizient in flüssiger Phase	Eingabe
Stoffspezifischer Isentropenexponent	Eingabe
Allgemeine Gaskonstante	Eingabe
Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche aus Betrachtungsraum (sofern keine Vorgabe: Ermittlung aus Berechnungssystematik, ggf. unter Berücksichtigung Zeitabhängigkeit)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Eingangsgrößen der Ausbreitungsmodelle¹⁵⁸:	
Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsfläche	Arbeitsgegenstand
Dynamische Viskosität Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Eingabe
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Eingabe
Stoffspezifische Enthalpie samt Referenztemperatur der Angabe	Eingabe
Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität samt Referenztemperatur der Angabe	Eingabe
Massenanteile Stoffe in Umgebungsatmosphäre zu Beginn der Betrachtung (sofern abweichend zur standardisierten Zusammensetzung von Umgebungsluft)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Dichte Umgebungsatmosphäre (ggf. als Ausgangswert zu Beginn der Betrachtung)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Temperatur Umgebungsatmosphäre (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Geometrische und thermodynamische Rahmenbedingungen¹⁵⁹:	
Zu- und Abluft von Betriebsmitteln (über Lüftungstechnische Parameter)	Arbeitsmittel
Thermische Bedingungen an Betriebsmitteln (über Oberflächentemperaturen, thermische Übergangsbedingungen etc.)	Arbeitsmittel
Bewegungen von Betriebsmitteln (über Angaben zu Bewegungsrichtungen, -geschwindigkeiten, -beschleunigungen etc.)	Arbeitsmittel
Thermische Bedingungen von Personen (über Körpermaße und Ausrichtung, Oberflächentemperaturen, thermische Übergangsbedingungen etc.)	Mensch
Außere Abmessungen (über Längen, Breiten, Höhen, Fläche und Position Öffnungen etc.)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Unterzüge, Versprünge, Stützen und weitere Bauteile	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Betriebstechnische Einbauten (über Längen, Breiten, Höhen)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Lufteströmungen in den Raum (über Lüftungstechnische Parameter)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Luftabführungen aus dem Raum (über Lüftungstechnische Parameter)	Umgebungs- und Umwelteinflüsse

¹⁵⁸ Sofern Eingangsgrößen bereits unter den für Emissionsmodelle erforderlichen Rahmenbedingungen aufgezählt wurden, erfolgt an dieser Stelle keine wiederholende Benennung.

¹⁵⁹ Sofern Eingangsgrößen bereits unter den für Emissions- oder Ausbreitungsmodelle erforderlichen Rahmenbedingungen aufgezählt wurden, erfolgt an dieser Stelle keine wiederholende Benennung.

Parameter	Arbeitssystemelement
Kinematische Viskosität der Umgebungsluft	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Rahmenbedingungen der Tätigkeit und Arbeitsorganisation:	
Zeitlicher Emissionsverlauf	Arbeitsgegenstand
Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel	Arbeitsmittel
Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten (über Position und Berücksichtigung Körpermaße)	Arbeitsablauf
Zeitdauern des Aufenthalts von Beschäftigten	Arbeitsablauf
Zeitlicher Verlauf Lüftungstechnischer Maßnahmen	Umgebungs- und Umwelteinflüsse
Überschneidung von Stoffkonzentrationen und zeitabhängigen Aufenthaltsdauern Beschäftigter	Arbeitsablauf
Grenzwert zur stoff- und tätigkeitsspezifischen Bewertung:	
Stoffspezifischer Grenzwert	Eingabe
Spitzenbegrenzung Grenzwert	Eingabe
Zeitbezug Grenzwert	Eingabe

Tabelle B.12: Zuordnung charakteristischer Parameter zu Arbeitssystemelementen

Anhang C

Abschließende Darstellung des Arbeitssystems

Die nachfolgende Tabelle stellt die abschließende Konkretisierung der Arbeitssystemelemente entsprechend der in Kap. 4.3 und Kap. 5.1 erläuterten Größen und Parameter dar. Die Aufstellung beinhaltet sowohl unmittelbare Eingangsgrößen verschiedener Modellkonzepte und allgemeine Rahmenbedingungen des Raums und der Tätigkeit als auch Steuergrößen zur Beeinflussung der verwendeten Algorithmen.

Charakteristische Größen, die der konzipierten Auswahlsystematik der Emissionsmodelle zugrunde liegen, sind in kursiver Schrift aufgeführt. Die farbliche Markierung weist auf die Zugehörigkeit von Eingangsgrößen zu Modellkonzepten hin, deren Ermittlung entfallen kann, wenn das entsprechende Modell nicht zur Anwendung kommt. Folgende farbliche Markierung wird genutzt:

Farbe	Modellart
	Annahme Emission
	Gas-Emission aus Behältern
	Verdunstungsmodelle
	Verdampfungs- bzw. Sublimationsmodell

Tabelle C.1: Zuordnung der farblichen Markierung zu Emissionsmodellen

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(1) Arbeitsaufgabe:			
(1.1) Beschreibung der Aufgabenstellungen	Benennung / Beschreibung		–
	Position der Verrichtung		<i>m</i>
(2) Arbeitsgegenstand:			
(2.1) Beschreibung der Stoffemission - verfahrensbedingte Eigenschaften	<i>Emissionsart (sofern bekannt)</i>		–
	Position Emissionsfläche im Arbeitsraum		<i>m</i>
	Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsflä- che		<i>m</i>
	Emissions- bzw. Öffnungs- fläche (von Behältern bzw. Grenzfläche des Phasenüber- gangs)		<i>m</i> ²
	Länge Emissionsfläche in Strömungsrichtung (für Emission durch flächenbe- zogene Verdunstung oder Verdampfung)		<i>m</i>
	Kontraktionskoeffizient Emissions- bzw. Öffnungsflä- che von Behältern		–
	Flächenbezogener Gesamt- Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$
	Flächen- und komponenten- bezogener Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als un- mittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrach- tungen)		$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$
	Emissions-Strömungsge- schwindigkeit von Gasen in Normalrichtung (als un- mittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrach- tungen)		<i>m/s</i>
	Stationärer Druck innerhalb Behälter		<i>Pa</i>
Zeitlicher Emissionsverlauf		<i>s</i>	
(3) Arbeitsmittel:			
(3.1) Geometrie verwendeter Arbeitsmittel	Abmessungen Arbeitsmittel		<i>m</i>
	Position in Arbeitsraum		<i>m</i>

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(3.2) Zu- und Abluft Arbeitsmittel	Abmessungen und Fläche Zu- / Abluftöffnungen		m m^2
	Position und Ausrichtung Zu- / Abluftöffnungen		m
	Kontraktionskoeffizient Zu- / Abluftöffnungen		–
	Strömungsgeschwindigkeit in Zu- / Abluftöffnungen		m/s
(3.3) Thermische Bedingungen Arbeitsmittel	Materialien der Oberflächen		–
	Oberflächentemperaturen Arbeitsmittel (ggf. mit geometrischer Zuordnung)		K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Arbeitsmittel-Oberflächen		–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien		$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien		$kJ/(kg K)$
(3.4) Ausgangszustand Fluid-Behälter	Gesamt-Stoffmasse in Behälter		kg
	Behälter-Innendruck zu Betrachtungsbeginn		Pa
	Überdruck Behälter gegenüber Umgebung zu Betrachtungsbeginn		Pa
(3.5) Bewegungen von Betriebsmitteln	Ausgeführte Bewegungen		–
	Bewegungsrichtungen		–
	Bewegungsgeschwindigkeit		m/s
	Beschleunigungen von Bewegungen		m/s^2
(3.6) Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel			s
(4) Mensch:			
(4.1) Körperabmessungen (Annahme)	Kopf	x: 0,15 y: 0,10 z: 0,20	m
	Torso	x: 0,40 y: 0,15 z: 0,60	m
	Beine	x: 0,35 y: 0,15 z: 0,95	m
(4.2) Thermische Bedingungen des menschlichen Körpers (vereinheitlichte Annahmen)	Oberflächentemperatur ¹⁶⁰	Kopf: 310,15 Torso: 308,15 Beine: 303,15	K

¹⁶⁰ Pauschale Abschätzung der Temperaturen, ggf. Anpassung bei detaillierten Erkenntnissen (Berücksichtigung von klimatischen Bedingungen, Arbeitsschwere, Arbeitshaltung etc.).

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(5) Arbeitsablauf:			
(5.1) Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten	Position im Arbeitsraum (projizierter Körpermittelpunkt)		<i>m</i>
	Orientierung im Arbeitsraum		<i>m</i>
	Atembereich Beschäftigter (Haltung)		<i>m</i>
(5.2) Arbeitsorganisation	Zeitdauer des Aufenthalts von Beschäftigten		<i>s</i>
	Zeitpunkte Arbeitsaufnahme / -ende		<i>s</i>
	Zeitbezogene Positionswechsel		<i>s</i>
(6) Eingabe:			
(6.1) Inhärente Stoffeigenschaften	<i>Aggregatzustand</i>		–
	<i>Charakterisierung als Reinstoff oder Gemisch</i>		–
	Molenbruch der Komponenten (Charakterisierung der Zusammensetzung von Flüssigkeits-Gemischen)		–
	Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente		<i>g/mol</i>
	Dichte des Stoffes bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)		<i>kg/m³</i> bei T=293,15K
	Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als unmittelbare Annahme)		<i>K</i>
	<i>Temperatur der Flüssigkeit (Temperatur vor Phasenübergang, ggf. mit Zeitabhängigkeit als unmittelbare Annahme oder rechnerische Ableitung)</i>		<i>K</i>
	Sättigungsdampfdruck des Stoffes		<i>Pa</i>
	Dampfdruck Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre (ggf. unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit)		<i>Pa</i>
	Verdunstungstemperatur Flüssigkeit	Annahme: entsprechend Umgebungstemperatur	<i>K</i>
	<i>Stoffspezifische Siedetemperatur bei Umgebungstemperatur und -druck</i>		<i>K</i>
	<i>Stoffspezifische Sublimationstemperatur</i>		<i>K</i>
Stoffspezifische Verdampfungsenthalpie (ggf. unter Berücksichtigung Zeitabhängigkeit)		<i>kJ/kg</i>	

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Stoffspezifische Sublimationsenthalpie		kJ/kg
	Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre		m^2/s
	Empirischer, stoffspezifischer Aktivitätskoeffizient in flüssiger Phase		–
	Stoffspezifischer Isentropenexponent		–
	Kinematische Viskosität Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)		m^2/s
	Spezifische Wärmeleitfähigkeit Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)		$W/(m K)$
	Stoffspezifische Enthalpie samt Referenztemperatur der Angabe		kJ/kg K
	Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität samt Referenztemperatur der Angabe		$kJ/(kg K)$ K
	Allgemeine Gaskonstante	8,3145	$J/(mol K)$
(6.2) Stoffspezifische Grenzwerte	Grenzwertkonzept		–
	Stoffspezifischer Grenzwert		g/m^3
	Spitzenbegrenzung Grenzwert		g/m^3
	Zeitbezug Grenzwert		h
(7) Ausgabe:			
keine Eingangsgrößen erforderlich			
(8) Umgebungs- und Umwelteinflüsse:			
(8.1) Geometrie des Arbeitsraumes	Länge		m
	Breite		m
	Höhe		m
(8.2) Strömungshindernisse in Arbeitsraum	Länge		m
	Breite		m
	Höhe		m
	Position im Arbeitsraum		m
(8.3) (Oberflächen-) Materialien Bauteile und Strömungshindernisse	Material		–
	Zuordnung Oberfläche		–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)		K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen		–

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien		$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien		$kJ/(kg K)$
(8.4) Öffnungen des Arbeitsraumes	Öffnungsfläche		m^2
	Position in Umfassungsbau- teilen		m
	Zeitliches Auftreten		s
(8.5) Raumluftechnische Maßnahmen	Fläche		m^2
	Position im Arbeitsraum		m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)		–
	Strömungsgeschwindigkeit in Öffnungsfläche		m/s
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung		s
(8.6) Stoffeigenschaften Umgebungsatmosphäre	Zusammensetzung Umge- bungsatmosphäre (Massen- anteile zu Betrachtungsbe- ginn)		–
	Dichte Umgebungsatmo- sphäre (ggf. als Ausgangs- wert zu Beginn der Betrach- tung)		kg/m^3
	Temperatur Umgebungs- atmosphäre (ggf. zu Be- trachtungsbeginn als Grund- größe)		K
	Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)		Pa
	Luftfeuchtigkeit Umgebungs- atmosphäre		%
	Kinematische Viskosität der Umgebungsluft		m^2/s
	Stoffkonzentration in Umge- bungsluft (als unmittelbare Annahme)		g/m^3
(8.7) Thermodynamische Umgebungsbedingungen	<i>Strömungsgeschwindigkeit Umgebungsatmosphäre ober- halb Flüssigkeitsoberfläche (ggf. als unmittelbare Annah- me)</i>		m/s
	Wärmestromdichte auf Flüs- sigkeitsoberfläche aus Be- trachtungsraum (ggf. als un- mittelbare Annahme)		W/m^2

Tabelle C.2: Abschließende Konkretisierung des Arbeitssystems als Methodik zur Erfassung benötigter Eingangsgrößen

Anhang D

Arbeitsschritte zur Parametrisierung des Ausbreitungsmodells FDS

1. Benennung und Beschreibung der Berechnung:

- Benennung der Parametrisierung und der Ergebnisdateien

```
HEAD:CHID="DATEINAMEN"
```

- Beschreibung der Berechnung

```
HEAD:TITLE="BESCHREIBUNG"
```

2. Diskretisierung des Berechnungsvolumens:

- Länge, Breite und Höhe des Berechnungsvolumens durch dreidimensionale Koordinaten (Ableitung aus geometrischen Rahmenbedingungen, Berücksichtigung Überstände¹⁶¹)

```
MESH:XB=X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2
```

- Festlegung der Anzahl von Kontrollvolumen über Unterteilung der dreidimensionalen Achsen in Berechnungsabschnitte

```
MESH:IJK=X,Y,Z
```

3. Festlegung des Berechnungsverhaltens des Modells:

- Betrachtungsdauer der Berechnung

```
TIME:TWFIN=[...]
```

- Abstand Zwischenspeicherungen (nach Berechnungszeit)

```
DUMP:DT_RESTART=[...]
```

- Festlegung zusätzlicher Ergebnisdateien

```
DUMP:MASS_FILE=.TRUE. oder .FALSE.
```

bzw.

```
DUMP:STATUS_FILES=.TRUE. oder .FALSE.
```

- Berechnungsform mit oder ohne Berücksichtigung von Temperaturunterschieden

```
MISC:ISOTHERMAL=.TRUE. oder .FALSE.
```

- Berücksichtigung Strahlungstransportgleichung

```
MISC:RADIATION=.TRUE. oder .FALSE
```

¹⁶¹ Zur korrekten Darstellung der Durchströmung von Öffnungen ins Freie bzw. in angrenzende Räume sollte die Darstellung die unmittelbare Umgebung (z.B. im Abstand von 1,00m) über die Umfassungsbauteile hinaus umfassen, so dass das Berechnungsvolumen geringfügig größer als der tatsächliche Betrachtungsraum ist (vgl. [12]).

4. Definition der thermodynamischen Rahmenbedingungen

- Umgebungstemperatur zu Berechnungsbeginn
MISC:TMPA=[...] oder INIT:TEMPERATURE=[...]
- Umgebungsdruck zu Berechnungsbeginn
MISC:P_INF=[...]
- Dichte der Umgebungsatmosphäre zu Berechnungsbeginn
INIT:DENSITY=[...]
- Luftfeuchtigkeit zu Berechnungsbeginn
MISC:HUMIDITY=[...]

5. Definition der geometrischen Bedingungen des Berechnungsraums (Längen, Breiten, Höhen, räumliche Anordnung)

- Raumabmessungen und Wände
OBST:XB=x₁,x₂,y₁,y₂,z₁.z₂
- Strömungshindernisse
OBST:XB=x₁,x₂,y₁,y₂,z₁.z₂
- Einrichtungen und Einbauten
OBST:XB=x₁,x₂,y₁,y₂,z₁.z₂
- Raumöffnungen
HOLE:XB=x₁,x₂,y₁,y₂,z₁.z₂

6. Definition und Zuweisung von Baustoff- und Bauteileigenschaften zu Oberflächen

- Festlegung Baustoffeigenschaften
 - Benennung
MATL:ID="BAUSTOFFNAME"
 - Wärmeleitfähigkeit
MATL:CONDUCTIVITY=[...]
 - Spezifische Wärmespeicherkapazität
MATL:SPECIFIC_HEAT=[...]
 - Dichte
MATL:DENSITY=[...]
 - Emissionsfaktor der Wärmestrahlung
MATL:EMISSIVITY=[...]
- Festlegung Bauteileigenschaften
 - Benennung
SURF:ID="BAUTEILNAME"
 - Beinhaltete Baustoffe
SURF:MATL_ID="BAUSTOFFNAME"
 - Farbgebung Smokeview
SURF:COLOR="FARBCODE"
 - Darstellungstransparenz Smokeview
SURF:TRANSPARENCY=[...]
 - thermische Dicke
SURF:THICKNESS=[...]
 - Oberflächentemperatur
SURF:TMP_FRONT=[...]

- Innentemperatur

```
SURF:TMP_INNER=[...]
```

- Festlegung Standard-Bauteil für Oberflächen

```
MISC:SURF_DEFAULT="BAUTEILNAME"
```

- Zuweisung Bauteile für Oberflächen

```
OBST:SURF_ID="BAUTEILNAME"
```

7. Beschreibung raumlufttechnischer Anlagen (Zu- und Abluftführung)

- Abmessungen, geometrische Anordnung und Ausrichtung

```
VENT:XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2; VENT:SURF_ID="NAME"
```

- Zu- und Abluftgeschwindigkeiten

```
SURF:ID="NAME"; SURF:VEL=[...]
```

8. Grob-Modellierung anwesender Personen durch Verwendung von Objekten (Kopf, Torso, Beine) mit angenäherten thermodynamischen Eigenschaften an entsprechenden Aufenthaltsorten

vgl. Charakterisierung von Baustoffen, Bauteilen und Objekten

9. Definition zeitabhängiger Steuerungen und Einflussgrößen

- Definition interne Zeitmessung

```
DEVC:ID="NAME"; DEVC:XYZ=X,Y,Z; DEVC:QUANTITY='TIME'
```

- Öffnung bzw. Schließen vorhandener Raumöffnungen

```
HOLE:DEVC_ID="NAME";
```

```
DEVC:SETPOINT=[...]; DEVC:INITIAL_STATE=.FALSE. oder .TRUE.
```

- Verwendung der Zu- und Abluftführung

```
VENT:RAMP_V="NAME"; RAMP:ID="NAME"; RAMP:T=[...] (Zeit oder  
Temperatur); RAMP:F=[...] (funktionale Ausprägung)
```

- Aufenthaltsorte und "Verschiebungen" von Personen (Modellierung von Standortwechseln während Tätigkeit)

```
OBST:XB=x1,x2,y1,y2,z1,z2; OBST:DEVC_ID="NAME1"; DEVC:SETPOINT=[...];
```

```
DEVC:INITIAL_STATE=.FALSE. oder .TRUE.;
```

```
OBST:DEVC_ID="NAME2"; DEVC:SETPOINT=[...]; DEVC:INITIAL_STATE=.FALSE.  
oder .TRUE.
```

10. Definition Stoffeigenschaften des Emittenten

- Molekulargewicht

```
SPEC:MW=[...]
```

- Temperatur der Emissionsströmung

```
SURF:TMP_FRONT=[...]
```

- bei Gemischen: Gemischzusammensetzung durch Einzelkomponenten

```
SURF:MASS_FLUX(I)=[...]; SURF:MASS_FLUX(II)=[...]; etc.
```

- Diffusionskoeffizient in Umgebungsatmosphäre

```
SPEC:DIFFUSIVITY=[...]
```

- Dynamische Viskosität in Umgebungsatmosphäre

```
SPEC:VISCOSITY=[...]
```

- Stoffspezifische Wärmeleitfähigkeit

```
SPEC:CONDUCTIVITY=[...]
```

- Stoffspezifische Enthalpie
SPEC:SPECIFIC_ENTHALPY=[...]
- Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität
SPEC:SPECIFIC_HEAT=[...]
- Festlegung der Referenztemperatur der Werte von spezifischer Enthalpie und Wärmespeicherkapazität
SPEC:REFERENCE_TEMPERATURE=[...]

11. Definition der Zusammensetzung der Umgebungsatmosphäre (falls von standardisierter Luft abweichend) bzw. Beschreibung von Hintergrundkonzentration zu Betrachtungsbeginn

INIT:MASS_FRACTION(I)=[...]; INIT:MASS_FRACTION(II)=[...]; etc.

12. Definition der tätigkeitsbedingten Emissionsparameter

- Emissionsfläche
VENT:XB=X₁,X₂,Y₁,Y₂,Z₁,Z₂; VENT:SURF_ID="EMISSION"
- flächenbezogener Emissions-Massenstrom Komponente I
SURF:ID="EMISSION"; SURF:MASS_FLUX(I)=[...]
- flächenbezogener Gesamt-Emissions-Massenstrom
SURF:ID="EMISSION"; SURF:MASS_FLUX_TOTAL=[...]
- zeitabhängiger Emissionsverlauf
SURF:RAMP_MF(I)="NAME"; RAMP:ID="NAME";
RAMP:T=[...] (flächenbezogener Emissions-Massenstrom);
RAMP:F=[...] (funktionale Ausprägung)

13. Definition der quantitativen und qualitativen Ergebnisberechnung bzw. -auswertung

- Benennung und räumliche Anordnung Messpunkte
DEVC:ID="NAME"; DEVC:XYZ=X, Y, Z
- Definition Ausgabegrößen der Messpunkte: Stoffkonzentration, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit
DEVC:QUANTITY='DENSITY', 'TEMPERATURE', 'VELOCITY';
DEVC:SPEC_ID="NAME"
- Definition Überwachung Volumenströme Zu- und Abluft
DEVC:XB=X₁,X₂,Y₁,Y₂,Z₁,Z₂; DEVC:QUANTITY='VOLUME_FLOW'
- Definition Slice-Ebenen Smokeview (räumliche Anordnung und Auswertegrößen)
SLCF:PBX=[...] oder PBY=[...] oder PBZ=[...];
SLCF:QUANTITY='DENSITY', 'TEMPERATURE', 'VELOCITY';
SLCF:SPEC_ID="NAME"
- Definition Isosurface-Flächen (Auswertegröße, Schwellenwerte [bspw. AGW, 1/2 AGW o.ä.])
ISOF:QUANTITY='DENSITY'; ISOF:SPEC_ID="NAME"; ISOF:VALUE(1)=[...];
ISOF:VALUE(2)=[...]; ISOF:VALUE3=[...]
- Definition Messungen für Vorbetrachtungen
 - Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Flüssigkeitstemperatur
DEVC:XYZ=X, Y, Z; DEVC:ID="TEMP_FL"; DEVC:QUANTITY='INSIDE_WALL_TEMPERATURE'; DEVC:DEPT=[...]; DEVC:IOR=[...]

- Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Strömungsgeschwindigkeit über Flüssigkeitsoberfläche

```
DEVC:XYZ=X,Y,Z; DEVC:ID="GESCHW"; DEVC:QUANTITY='VELOCITY'
```

- Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Umgebungstemperatur

```
DEVC:XYZ=X,Y,Z; DEVC:ID="TEMP"; DEVC:QUANTITY='TEMPERATURE'
```

- Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Wärmestromdichte auf Stoffoberfläche

```
DEVC:XB(6)=x1,x2,y1,y2,z1,z2; DEVC:ID="WAERME"; DEVC:QUANTITY='NET  
HEAT FLUX'
```


Anhang E

Auswahlsystematik der Emissionsmodelle

Eingangsgröße	Vorhandene Größe	Verdunstungsmodell Mackay / Matsugu	Verdunstungsmodell Weidlich / Gmehling	Verdampfungs- und Sublimationsmodell
<i>Aggregatzustand</i>		flüssig	flüssig	flüssig bzw. fest
<i>Primärzustand</i>		konstante Flüssigkeitsoberfläche	konstante Flüssigkeitsoberfläche	konstante Flüssigkeitsoberfläche bzw. flächiger Feststoff
<i>Zusammensetzung</i>		Reinstoff	Reinstoff oder Gemisch	keine Anforderung
<i>Strömungsgeschwindigkeit über Oberfläche</i>		0,00-6,70 m/s	0,20-0,70 m/s	keine Anforderung
<i>Stofftemperatur</i>		Stoffspezifische Siedetemperatur	Stoffspezifische Siedetemperatur	Stoffspezifische Siedetemperatur bzw. Stoffspezifische Sublimationstemperatur

Tabelle E.1: Vergleichsmatrix zwischen Rahmenbedingungen der Tätigkeit und Modellansätzen zur Stoffemission

Anhang F

Arbeitssysteme der Validierungsuntersuchungen

Die im Anschluss dargestellten Arbeitssysteme sind auf die vorliegenden grundlegenden Rahmenbedingungen der verschiedenen Untersuchungen beschränkt und werden durch die jeweiligen einzelfallspezifischen Größen der unterschiedlichen Versuchsszenarien ergänzt. Aufgrund der in [95] dargelegten Erläuterungen stellen die in Anhang F.1 aufgeführten geometrischen Abmessungen bereits die idealisierten Angaben zur Übernahme in die Berechnungen dar, die jeweiligen Kantenlängen der parametrisierten Berechnungsgitter sind in den Rundungen berücksichtigt. Die Angaben der übrigen Betrachtungsfälle stellen dagegen zur Verdeutlichung die tatsächlichen Maße dar. In der Umsetzung in das Ausbreitungsmodell erfolgte ebenfalls eine entsprechende Rundung auf Kantenlängen von $0,05\text{ m}$. Zur vereinfachten Darstellung der Parameter werden die nicht erforderlichen Abfragen des konkretisierten Arbeitssystem-Modells (vgl. Anhang C) vernachlässigt.

F.1 DGUV-Forschungsprojekt FP 354

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(1) Arbeitsaufgabe:			
(1.1) Beschreibung der Aufgabenstellungen	Benennung / Beschreibung	Überwachung Freisetzung von Propan bzw. Isopropanol	–
	Position der Verrichtung	stehend, vor zentralem Labortisch x^{162} : ca. 3,20 y^{163} : ca. 2,20 z^{164} : ca. 0,95	m

¹⁶² Angabe für Abstand "linke Wand" Versuchsraum, in Abb. 6.1 links.

¹⁶³ Angabe für Abstand "vordere Wand" Versuchsraum, in Abb. 6.1 unten.

¹⁶⁴ Angabe für absolute Höhe über Fussboden.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(2) Arbeitsgegenstand:			
(2.1) Beschreibung der Stoffemission - verfahrensbedingte Eigenschaften	Emissionsart (sofern bekannt)	Propan: direkte Gas- Einströmung Isopropanol: Verdunstung	–
	Position Emissionsfläche im Arbeitsraum	Propan: Position I: x: 3,65 y: 2,30 z: 1,10 Position II: x: 3,00 y: 3,20 z: 1,05	<i>m</i>
		Isopropanol: Position I (2 Schalen): x: 2,85 y: 2,45 z: 1,00 Position II (2 Schalen): x: 2,70 y: 2,45 z: 1,00 Position III (1 Schale): x: 3,30 y: 2,45 z: 1,00	<i>m</i>
	Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsfläche	Propan: Orientierung aufwärts Isopropanol: Orientierung aufwärts	–
	Emissions- bzw. Öffnungsfläche (von Behältern bzw. Grenzfläche des Phasenübergangs)	Propan: 0,3117 <i>cm</i> ² Isopropanol: 0,12 und 0,24 <i>m</i> ²	–
	Länge Emissionsfläche in Strömungsrichtung (für Emission durch flächenbezogene Verdunstung oder Verdampfung)	0,36 und 0,72	<i>m</i>
	Kontraktionskoeffizient Emissions- bzw. Öffnungsfläche von Behältern	nicht erforderlich	–
	Flächenbezogener Gesamt-Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	einzelfall- abhängige Ermittlung	$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$
	Flächen- und komponentenbezogener Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Emissions-Strömungsgeschwindigkeit von Gasen in Normalrichtung (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	nicht erforderlich	m/s
	Stationärer Druck innerhalb Behälter		Pa
	Zeitlicher Emissionsverlauf	Annahme: zeitliche Gleichmäßigkeit je Einzelfall (zeitbezogene Mittelung) Emissionsdauer ¹⁶⁵ : 1.800	s
(3) Arbeitsmittel:			
(3.1) Geometrie verwendeter Arbeitsmittel	Abmessungen Arbeitsmittel	keine Verwendung Arbeitsmittel	m
(3.2) Zu- und Abluft Arbeitsmittel	Abmessungen und Fläche Zu- / Abluftöffnungen	keine Verwendung Arbeitsmittel	m m^2
(3.3) Thermische Bedingungen Arbeitsmittel	Materialien der Oberflächen	keine Verwendung Arbeitsmittel	–
(3.4) Ausgangszustand Fluid-Behälter	Gesamt-Stoffmasse in Behälter	einzelfallabhängige Ermittlung	kg
	Behälter-Innendruck zu Betrachtungsbeginn	nicht erforderlich	Pa
	Überdruck Behälter gegenüber Umgebung zu Betrachtungsbeginn		Pa
(3.5) Bewegungen von Betriebsmitteln	Ausgeführte Bewegungen	keine Verwendung beweglicher Betriebsmittel	–
(3.6) Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel		keine Verwendung Betriebsmittel	s
(4) Mensch:			
(4.1) Körperabmessungen (Annahme)	Kopf	x: 0,15 y: 0,10 z: 0,20	m
	Torso	x: 0,40 y: 0,15 z: 0,60	m
	Beine	x: 0,35 y: 0,15 z: 0,95	m
(4.2) Thermische Bedingungen des menschlichen Körpers (vereinheitlichte Annahmen)	Oberflächentemperatur	Kopf: 310,15 Torso: 308,15 Beine: 303,15	K

¹⁶⁵ Entspricht Versuchsdauer.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(5) Arbeitsablauf:			
(5.1) Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten	Position im Arbeitsraum (projizierter Körpermittelpunkt)	stationäre Position: x: 3,00 y: 1,90 z: 0,00 (Boden)	<i>m</i>
	Orientierung im Arbeitsraum	x-Richtung	–
	Atembereich Beschäftigter (Haltung)	x-Richtung, zu Emission gewandt	–
(5.2) Arbeitsorganisation	Zeitdauern des Aufenthalts von Beschäftigten	1.800 (gesamte Versuchsdauer) Ausnahmefälle Isopropanol: 0 ¹⁶⁶	<i>s</i>
	Zeitpunkte Arbeitsaufnahme / -ende	0-1.800	<i>s</i>
	Zeitbezogene Positionswechsel	keine Wechsel	<i>s</i>
(6) Eingabe:			
(6.1) Inhärente Stoffeigenschaften	Aggregatzustand	Propan: gasförmig Isopropanol: flüssig	–
	Charakterisierung als Reinstoff oder Gemisch	Propan: Reinstoff Isopropanol: Reinstoff	–
	Molenbruch der Komponenten (Charakterisierung der Zusammensetzung von Flüssigkeits-Gemischen)	Isopropanol: 1	–
	Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente	Propan: 44 Isopropanol: 60	<i>g/mol</i>
	Dichte des Stoffes bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)	Propan: 1,873 Isopropanol (Dampf): 2,490	<i>kg/m³</i> bei T=293,15K
	Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als unmittelbare Annahme)	Annahme: unmittelbarer Temperatureausgleich Propan zu Umgebung	<i>K</i>
	Temperatur der Flüssigkeit (Temperatur vor Phasenübergang, ggf. mit Zeitabhängigkeit als unmittelbare Annahme oder rechnerische Ableitung)	Annahme: Isopropanol entsprechend Umgebungstemperatur	<i>K</i>
	Sättigungsdampfdruck des Stoffes	Propan: 830.000,00 Isopropanol: 4.300,00	<i>Pa</i>

¹⁶⁶ Entsprechend einzelfallabhängiger Dokumentation.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Dampfdruck Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre (ggf. unter Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit)	nicht erforderlich	Pa
	Verdunstungstemperatur Flüssigkeiten	Annahme: Isopropanol entsprechend Umgebungs- temperatur	K
	Stoffspezifischer Siedepunkt bei Umgebungsdruck	Propan: 231,15 Isopropanol: 353,65	K
	Stoffspezifische Sublimationstemperatur	nicht erforderlich	K
	Stoffspezifische Verdampfungsenthalpie (ggf. unter Berücksichtigung Zeitabhängigkeit)	Propan: 352,50 (bei 288,15 K) Isopropanol: 64,17 (bei 353,65 K)	kJ/kg
	Stoffspezifische Sublimationsenthalpie	nicht erforderlich	kJ/kg
	Stoffspezifischer Diffusionskoeffizient Stoff oder Komponente in Umgebungsatmosphäre	Propan: nicht erforderlich Isopropanol: Abschätzung nach Arnold und Engel	m ² /s
	Empirischer, stoffspezifischer Aktivitätskoeffizient in flüssiger Phase	Isopropanol: 1	–
	Stoffspezifischer Isentropenexponent	Propan: 1,10	–
	Kinematische Viskosität Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Propan: 8,3 · 10 ⁻⁶ (bei 298,15 K) Isopropanol: 3,63 · 10 ⁻² bei 293,15 K Umgebung: Annahme als stan- dardisierte Zusammen- setzung	m ² /s
	Spezifische Wärmeleitfähigkeit Stoff oder Komponente (emittierte Stoffe sowie Komponenten der Umgebungsatmosphäre, sofern von standardisierter Umgebungsluft abweichende Zusammensetzung)	Propan: 180,00 · 10 ⁻⁴ Umgebung: Annahme als stan- dardisierte Zusammen- setzung	W/(m K)

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Stoffspezifische Wärmespeicherkapazität samt Referenztemperatur der Angabe	Propan: 1,696 (bei 298,15 K) Isopropanol (Dampf): 1,489 (bei 298,15 K)	$kJ/(kg K)$ K
	Allgemeine Gaskonstante	8,3145	$J/(mol K)$
(6.2) Stoffspezifische Grenzwerte	Grenzwertkonzept	Propan und Isopropanol: AGW gem. TRGS 900 (kein Grenzwertvergleich, nicht erforderlich)	–
	Stoffspezifischer Grenzwert	Propan: 1,80 Isopropanol: 0,50	g/m^3
	Spitzenbegrenzung Grenzwert	Propan und Isopropanol: 4 (II)	g/m^3
	Zeitbezug Grenzwert	Propan und Isopropanol: 8 h	h
(7) Ausgabe:			
keine Eingangsgrößen erforderlich			
(8) Umgebungs- und Umwelteinflüsse:			
(8.1) Geometrie des Arbeitsraumes (Innenmaße, vgl. Abb. 6.1)	Länge (x)	5,80	m
	Breite (y)	5,30	m
	Höhe (z)	bis y=4,80: 2,40 ab x=2,90 und y=4,80: 3,00	m
(8.2) Strömungshindernisse in Arbeitsraum			
Wandversprünge	I	zwischen: x=5,25-5,80, y=0,00-1,15 volle Raumhöhe	m
	II	zwischen: x=5,55-5,80 y=4,80-5,30 volle Raumhöhe	m
Arbeitstisch I	Länge (x)	3,40	m
	Breite (y)	0,80	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	x,y,z=0,00	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	x=0,00-0,35 y=0,25-0,75 z=0,90-1,30	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
Regal I	Länge (x)	2,45	m
	Breite (y)	0,30	m
	Höhe (z)	0,05	m
	Position (Oberkante)	x,y=0,00 z=1,75	m
	Position Unterlagen (Papier)	x=0,00-0,30 y=0,45-1,70 und 1,95-2,90 z= 1,75-2,10	m
Arbeitstisch II	Länge (x)	0,80	m
	Breite (y)	2,90	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	x,y,z=0,00	m
Regal II	Länge (x)	0,35	m
	Breite (y)	2,40	m
	Höhe (z)	1,75	m
	Position (Oberkante)	x=0,00 y=0,50 z=1,75	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	x=1,10-1,55 y=0,00-0,20 z=1,75-1,90	m
Wandschrank Laborabzug	Länge (x)	0,85	m
	Breite (y)	2,40	m
	Höhe (z)	2,40	m
	Position	x,z=0,00 y=2,90	m
Wandschrank	Länge (x)	2,90	m
	Breite (y)	0,60	m
	Höhe (z)	2,40	m
	Position	x,z=0,00 y=4,70	m
Labortisch (zentral)	Länge (x)	2,15	m
	Breite (y)	1,35	m
	Höhe (z)	0,90	m
	Position	x=2,00 y=2,20 z=0,00	m
Aufbau zentraler Labortisch	Länge (x)	2,15	m
	Breite Ablagefläche (y)	0,55	m
	Dicke Ablagefläche (z)	0,05	m
	Höhe Ablagefläche über Tischplatte (Oberkante)	0,75	m
	Anzahl Stützen	4	–
	Dicke Stützen (x)	0,05	m
	Breite Stützen (y)	0,15 (je Seite 0,20 Überstand Ab- lagefläche)	m
	Höhe Stützen über Tischplatte (z)	1,10	m
	Abstand Stützen (x)	außen: je 0,55 Mitte: 0,85	m
	Position	x=2,00 y=2,80 z=0,90	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
Variabler Arbeitstisch	Länge (x)	1,50	m
	Breite (y)	0,75	m
	Höhe Tischplatte (z, Oberkante)	0,75	m
	Dicke Tischplatte (z)	0,05	m
	Abmessungen Tischbeine (x,y)	je 0,05	m
	Anordnung Tischbeine	jew. unmittelbar an Außenkante	–
	Position	x=3,60 y=4,65 z=0,00	m
PC-Ausstattung	Abmessungen Tastatur	x= 0,45 y=0,25 z=0,05	m
	Position Tastatur	x=4,00 y=4,90 z=0,75	m
	Abmessungen PC-Maus	x=0,05 y=0,10 z=0,05	m
	Position PC-Maus (Annahme)	x=4,55 y=4,90 z=0,75	m
	Abmessungen PC	x=0,30 y=0,30 z=0,10	m
	Position PC	x=4,70 y=4,75 z=0,75	m
	Abmessungen Monitorfuss	x=0,10 y=0,05 z=0,10	m
	Position Monitorfuss	x=4,80 y=4,85 z=0,85	m
	Abmessungen Monitorbildschirm	x=0,40 y=0,05 z=0,40	m
	Position Monitorbildschirm	x=4,65 y=4,85 z=0,95	m
Druckertisch	Länge (x)	0,60	m
	Breite (y)	0,75	m
	Höhe Tischplatte (z, Oberkante)	0,95	m
	Höhe Zwischenplatte (z, Oberkante)	0,25	m
	Dicke Tischplatten (z)	0,05	m
	Abmessungen Tischbeine (x,y)	je 0,05	m
	Anordnung Tischbeine	jew. unmittelbar an Außenkante	–
	Position	x=5,10 y=5,30 z=0,00	m
	Abmessungen Drucker	x= 0,40 y= 0,45 z= 0,50	m
	Position Drucker	x= 5,10 y=4,75 z= 0,95	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Abmessungen Büroeinrichtung (PVC)	x= 0,25 y= 0,35 z= 0,30	m
	Position Büroeinrichtung (PVC)	x= 5,40 y=4,75 z= 0,25	m
Abfalltonne (nur für Isopropanol-Versuche)	Abmessungen	x= 0,30 y=0,30 z=0,40	m
	Position	x=2,00 y=0,80 z=0,00	m
(8.3) (Oberflächen-) Materialien Bauteile und Strömungshindernisse	Material	Stein	–
	Zuordnung Oberfläche	Außenwand	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,69	W/(m K)
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	kJ/(kg K)
	Materialdichte	1.600,00	kg/m ³
	Annahme thermische Dicke	0,20	m
	Material	Beton	–
	Zuordnung Oberfläche	Decke	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	1,37	W/(m K)
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,88	kJ/(kg K)
	Materialdichte	2.100,00	kg/m ³
	Annahme thermische Dicke	0,30	m
	Material	Gipskarton	–
	Zuordnung Oberfläche	Raumwände	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	W/(m K)
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,48	kJ/(kg K)
	Materialdichte	1.440,00	kg/m ³
	Annahme thermische Dicke	0,20-0,30	m
	Material	Fensterglas	–
	Zuordnung Oberfläche	Fenster, Verschluss Laborabzug	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,78	W/(m K)

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	2.700,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,05	m
	Material	Holz	–
	Zuordnung Oberfläche	Laboreinbauten, Mobilier	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,166	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	2,40	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	540,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,10	m
	Material	Papier	–
	Zuordnung Oberfläche	Bücher auf Ablagen	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,18	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	1,20	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	930,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,35	m
	Material	PVC	–
	Zuordnung Oberfläche	Einrichtung	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,15	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	1,50	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	1.440	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,05	m
	Material	V2A	–
	Zuordnung Oberfläche	Einrichtung	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	16,30	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,46	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	7.817,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,05	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(8.4) Öffnungen des Arbeitsraumes			
Zugangstür	Öffnungsfläche	1,60	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=00 y=3,75 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), ggf. pauschale Annahme Undichtigkeit	s
Tür Lager 1	Öffnungsfläche	1,295	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,80 y=1,80 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), ggf. pauschale Annahme Undichtigkeit	s
Tür Lager 2	Öffnungsfläche	1,295	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,80 y=1,80 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Holz), ggf. pauschale Annahme Undichtigkeit	s
Fenster I	Öffnungsfläche	0,18	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=3,00 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
Fenster II	Öffnungsfläche	0,58	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=3,50 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
Fenster III	Öffnungsfläche	0,18	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=5,00 y=5,30 (Außenwand) z=2,50	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(8.5) Raumluftechnische Maßnahmen:			
Zuluftöffnung 1	Fläche	0,0768 (für Berechnungen: 0,08) bzw. 0,0240	m^2
	Position im Arbeitsraum	x=1,45 y=2,65 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Zuluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Isopropanol: Einzelfallabhängige Abschaltung	s
Zuluftöffnung 2	Fläche	0,0768 (für Berechnungen: 0,08) bzw. 0,0240	m^2
	Position im Arbeitsraum	x=4,35 y=2,65 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Zuluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Isopropanol: Einzelfallabhängige Abschaltung	s
Abluftöffnung	Fläche	0,09	m^2
	Position im Arbeitsraum	x=2,70 y=1,00 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Isopropanol: Einzelfallabhängige Abschaltung	s
Abluftöffnungen Lager 1	Fläche	je 0,005	m^2
	Positionen im Arbeitsraum	x=6,50 und 6,65 y=1,50 und 2,90 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Isopropanol: Einzelfallabhängige Abschaltung	s

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
Abluftöffnungen Lager 2	Fläche	je 0,005	m^2
	Positionen im Arbeitsraum	x=6,50 und 6,65 y=3,35 und 5,00 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb Ausnahme Isopropanol: Einzelfallabhängige Abschaltung	s
(8.6) Stoffeigenschaften Umgebungsatmosphäre	Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre (Massenanteile zu Betrachtungsbeginn)	Annahme als standardisierte Zusammensetzung	–
	Dichte Umgebungsatmosphäre (ggf. als Ausgangswert zu Beginn der Betrachtung)	28,97	kg/m^3
	Temperatur Umgebungsatmosphäre (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	einzelfallabhängige Ermittlung	K
	Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	einzelfallabhängige Ermittlung	Pa
	Luftfeuchtigkeit Umgebungsatmosphäre	einzelfallabhängige Ermittlung	%
	Kinematische Viskosität der Umgebungsluft	einzelfallabhängige Abschätzung nach Arnold und Engel	m^2/s
	Stoffkonzentration in Umgebungsluft (als unmittelbare Annahme)	einzelfallabhängiger Nachweis: Nullkonzentration	g/m^3
(8.7) Thermodynamische Umgebungsbedingungen	<i>Strömungsgeschwindigkeit Umgebungsatmosphäre oberhalb Flüssigkeitsoberfläche (ggf. als unmittelbare Annahme)</i>	Abschätzung über einzelfallabhängige Vorbereitung	m/s
	Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche aus Betrachtungsraum (ggf. als unmittelbare Annahme)	nicht erforderlich	W/m^2

Tabelle F.1: Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [95]

F.2 Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor

Zum Zweck der Übersichtlichkeit und verzichtet die tabellarische Aufstellung des aus den Versuchsdaten resultierenden Arbeitssystems auf die Benennung von Rahmenbedingungen, die bspw. standardisierten Umgebungsbedingungen entsprechen. Die Berechnungen berücksichtigen in diesen Fällen Werte, die den Angaben in Tab. F.1 entsprechen. Anhang F.1 führt weiterhin die vollständige Anwendung des Arbeitssystems zur Informationsermittlung aus.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(1) Arbeitsaufgabe:			
(1.1) Beschreibung der Aufgabenstellungen	Kalibrierversuche, ohne konkrete Aufgabe		–
	Position der Verrichtung	stehend, ca. Raummitte x^{167} , y^{168} , z^{169} : keine konkrete Tätigkeit	m
(2) Arbeitsgegenstand:			
(2.1) Beschreibung der Stoffemission - verfahrensbedingte Eigenschaften	<i>Emissionsart (sofern bekannt)</i>	alle Versuchsstoffe: direkte Gas-Einströmung	–
	Position Emissionsfläche im Arbeitsraum	Emission über 11 Lüftungsöffnungen	–
	Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsfläche	vertikale Orientierung	–
	Emissions- bzw. Öffnungsfläche (von Behältern bzw. Grenzfläche des Phasenübergangs)	Einzelflächen: ca. 0,00385 Gesamtfläche: ca. 0,04235	m^2
	Flächenbezogener Gesamt-Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	versuchsspezifischer Parameter	$\frac{g}{(s m^2)}$ $\frac{m^3}{(s m^2)}$
	Flächen- und komponentenbezogener Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		$\frac{g}{(s m^2)}$ $\frac{m^3}{(s m^2)}$
	Emissions-Strömungsgeschwindigkeit von Gasen in Normalrichtung (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	versuchsspezifischer Parameter (über Luftwechsel)	m/s
	Zeitlicher Emissionsverlauf	konstant, versuchsspezifische Ab- bzw. Einschaltung	s

¹⁶⁷ Angabe für Abstand Trennwand Schleuse, in Abb. 6.7 unten.

¹⁶⁸ Angabe für Abstand Trennwand Vorbereitungsraum, in Abb. 6.7 rechts.

¹⁶⁹ Angabe für absolute Höhe über Fussboden.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(3) Arbeitsmittel:			
(3.1) Geometrie verwendeter Arbeitsmittel	Abmessungen Ventilator	x: ca. 0,10 y: ca. 0,30 z: ca. 0,30	<i>m</i>
	Position in Arbeitsraum	x: ca. 3,75 y: ca. 1,30 Z: 0,00	<i>m</i>
(3.2) Zu- und Abluft Arbeitsmittel	Ventilatorfläche	ca. 0,075	<i>m</i> ²
	Position und Ausrichtung Ventilatorfläche	vertikal Richtung Wand Schleuse	<i>m</i>
	Strömungsgeschwindigkeit in Zu- / Abluftöffnungen	gemittelt: ca. 3,00	<i>m/s</i>
(3.3) Thermische Bedingungen Arbeitsmittel	Oberflächenmaterial Ventilator	PVC Charakterisierung unter Pkt. (8.3)	–
(3.4) Ausgangszustand Fluid-Behälter		nicht erforderlich	
(3.5) Bewegungen von Betriebsmitteln	Ausgeführte Bewegungen	keine Betriebsmittel	–
(3.6) Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel		keine Betriebsmittel	<i>s</i>
(4) Mensch:			
(4.1) Körperabmessungen (Annahme)	Kopf	x: 0,15 y: 0,10 z: 0,20	<i>m</i>
	Torso	x: 0,40 y: 0,15 z: 0,60	<i>m</i>
	Beine	x: 0,35 y: 0,15 z: 0,95	<i>m</i>
(4.2) Thermische Bedingungen des menschlichen Körpers (vereinheitlichte Annahmen)	Oberflächentemperatur	Kopf: 310,15 Torso: 308,15 Beine: 303,15	<i>K</i>
(5) Arbeitsablauf:			
(5.1) Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten	Position im Arbeitsraum (projizierter Körpermittelpunkt)	x: ca. 1,90 y: ca. 1,40 z: 0,00	<i>m</i>
	Orientierung im Arbeitsraum	nicht erforderlich	<i>m</i>
	Atembereich Beschäftigter (Haltung)	stehend (keine Messwerte aus Atembereich)	<i>m</i>
(5.2) Arbeitsorganisation	Zeitauern des Aufenthalts von Beschäftigten	(wenn berücksichtigt, gesamte Versuchsdauer [variierend])	<i>s</i>
	Zeitpunkte Arbeitsaufnahme / -ende	Versuchsdauer [variierend]	<i>s</i>
	Zeitbezogene Positionswechsel	keine Positionswechsel	<i>s</i>

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(6) Eingabe:			
(6.1) Inhärente Stoffeigenschaften	Aggregatzustand	alle Ver- suchsstoffe bei Emission gasförmig	–
	Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente	Ethylacetat: 88 Propylen: 42 n-Butanol: 74	<i>g/mol</i>
	Dichte des Stoffes bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)	Ethylacetat: 3,93 Propylen: 1,87 n-Butanol: 3,30	<i>kg/m³</i> bei T=273,15K
	Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als un-mittelbare Annahme)	entsprechend Raumtempe- ratur	<i>K</i>
	Allgemeine Gaskonstante	8,3145	<i>J/(mol K)</i>
(6.2) Stoffspezifische Grenzwerte	Grenzwertkonzept	nicht erforder- lich, kein Grenzwertver- gleich	–
(7) Ausgabe:			
keine Eingangsgrößen erforderlich			
(8) Umgebungs- und Umwelteinflüsse:			
(8.1) Geometrie des Arbeitsraumes (Innenmaße, vgl. Abb. 6.7)	Länge	x: ca. 3,92	<i>m</i>
	Breite	y: ca. 2,92	<i>m</i>
	Höhe	ca. 2,50	<i>m</i>
(8.2) Strömungshindernisse in Arbeitsraum			
Arbeitstisch	Länge (x)	ca. 3,90	<i>m</i>
	Breite (y)	ca. 0,77	<i>m</i>
	Höhe Tischplatte (z, Oberkante)	ca. 0,75	<i>m</i>
	Dicke Tischplatte (z)	0,015	<i>m</i>
	Abmessungen Tischbeine (x,y)	je 0,04	<i>m</i>
	Anordnung Tischbeine	2 Reihen mit je 8 Beinen, gleichmäßig verteilt	–
	Position	unmittelbar an Trennwand zu Vorberei- tungsraum	<i>m</i>
Unterteilungen Arbeitstisch	Länge (x)	ca. 0,015	<i>m</i>
	Breite (y)	ca. 0,77	<i>m</i>
	Höhe ab Tischplatte (z)	ca. 0,60	<i>m</i>
	Anordnung Unterteilungen	2 als Randab- schlüsse, 3 als innere Un- terteilungen gleichmäßig verteilt	–

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(8.3) (Oberflächen-) Materialien Bauteile und Strömungshindernisse	Material	V2A	–
	Zuordnung Oberfläche	Innenbekleidung Wände, Decke und Türen sowie Tischbeine	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	16,30	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,46	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	7.817,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,15	m
	Material	PVC	–
	Zuordnung Oberfläche	Boden, Ventilator	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,15	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	1,50	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	1.440	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,20	m
	Material	Holz	–
	Zuordnung Oberfläche	Tischplatten und -unterteilungen	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,166	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	2,40	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	540,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,05	m
	Material	Fensterglas	–
	Zuordnung Oberfläche	Fenster	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,78	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	2.700,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,15	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(8.4) Öffnungen des Arbeitsraumes			
Zugangstür Schleuse	Öffnungsfläche	1,60	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=00 y=0,80 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen	s
Zugangstür Beobachtungsraum	Öffnungsfläche	2,00	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=2,915 y=2,70 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen	s
Fenster Vorbereitungsraum I	Öffnungsfläche	1,16	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=0,20 y=0,00 (Wand Vorbereitungsraum) z=1,20	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
Fenster Vorbereitungsraum II	Öffnungsfläche	1,16	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=1,95 y=0,00 (Wand Vorbereitungsraum) z=1,20	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
Fenster Außenwand	Öffnungsfläche	0,99	m^2
	Position in Umfassungsbauteilen	x=3,92 y=1,50 (Außenwand) z=1,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
(8.5) Raumluftechnische Maßnahmen:			
Zuluftöffnungen	Fläche	Einzelfläche ca. 0,00385	m^2
	Position im Arbeitsraum	Trennwand Vorbereitungsraum: x: 7 Öffnungen gleichmäßig verteilt z: ca. 0,05 Trennwand Beobachtungsraum: x: 4 Öffnungen gleichmäßig verteilt z: ca. 0,05	m

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Zuluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb	s
Abluftöffnung 1	Fläche	ca. 0,0341	m ²
	Position im Arbeitsraum	x=0,63 y=1,30 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb	s
Abluftöffnung 2	Fläche	ca. 0,0341	m ²
	Position im Arbeitsraum	x=3,06 y=1,30 z: Decke	m
	Typ der Maßnahme (Zu- oder Abluft)	Abluft	–
	Zeitabhängige Luftführung bzw. Steuerung	konstanter Betrieb	s
(8.6) Stoffeigenschaften Umgebungsatmosphäre	Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre (Massenanteile zu Betrachtungsbeginn)	versuchsspezifische Zusammensetzung (ggf. Anfangskonzentrationen)	–
	Dichte Umgebungsatmosphäre (ggf. als Ausgangswert zu Beginn der Betrachtung)	versuchsspezifische Zusammensetzung (ggf. Anfangskonzentrationen)	kg/m ³
	Temperatur Umgebungsatmosphäre (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	ca. 295,15	K
	Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	Annahme: 101315,00	Pa
	Luftfeuchtigkeit Umgebungsatmosphäre	Annahme: 40	%
	Kinematische Viskosität der Umgebungsluft	versuchsspezifische Zusammensetzung (ggf. Anfangskonzentrationen)	m ² /s
	Stoffkonzentration in Umgebungsluft (als unmittelbare Annahme)	versuchsspezifische Zusammensetzung (ggf. Anfangskonzentrationen)	g/m ³
	(8.7) Thermodynamische Umgebungsbedingungen	Strömungsgeschwindigkeit Umgebungsatmosphäre oberhalb Flüssigkeitsoberfläche (ggf. als unmittelbare Annahme)	nicht erforderlich
Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche aus Betrachtungsraum (ggf. als unmittelbare Annahme)		nicht erforderlich	W/m ²

Tabelle F.2: Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen der Kalibrierversuche im IPA-Expositions-labor [96–98]

F.3 Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten

Analog zu Anhang F.2 verzichtet die Darstellung des Arbeitssystems zur Verbesserung der Übersichtlichkeit auf die für die Berechnungen nicht erforderlichen Parameter. Sofern nicht anders angegeben, erfolgt die Berücksichtigung von Standardwerten, die aus Anhang F.1 hervorgehen.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(1) Arbeitsaufgabe:			
(1.1) Beschreibung der Aufgabenstellungen	kein Personenaufenthalt bei Versuchsdurchführung		–
	Position der Verrichtung	–	m
(2) Arbeitsgegenstand:			
(2.1) Beschreibung der Stoffemission - verfahrensbedingte Eigenschaften	Emissionsart (sofern bekannt)	gasförmige CO-Emission durch chemische Reaktion	–
	Position Emissionsfläche im Arbeitsraum	x ¹⁷⁰ : ca. 3,96 y: ca. 0,36 z: ca. 1,04	m
	Geometrische Anordnung Emissions- bzw. Öffnungsfläche	horizontal in Richtung Decke	–
	Emissions- bzw. Öffnungsfläche (von Behältern bzw. Grenzfläche des Phasenübergangs)	0,0061	m ²
	Flächenbezogener Gesamt-Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)	spezifische Annahmen für Betrachtungsfälle	$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$
	Flächen- und komponentenbezogener Volumen- bzw. Massenstrom der Emission gasförmiger Stoffe (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		$\frac{g}{(s\ m^2)}$ $\frac{m^3}{(s\ m^2)}$
	Emissions-Strömungsgeschwindigkeit von Gasen in Normalrichtung (als unmittelbare Annahme bzw. Ergebnis Emissions-Betrachtungen)		m/s
	Zeitlicher Emissionsverlauf	konstant über Versuchsdauer (Annahme)	s
(3) Arbeitsmittel:			
(3.1) Geometrie verwendeter Arbeitsmittel	Abmessungen Arbeitsmittel	keine Verwendung Arbeitsmittel	m
(3.2) Zu- und Abluft Arbeitsmittel	Abmessungen und Fläche Zu- / Abluftöffnungen	keine Verwendung Arbeitsmittel	$\frac{m}{m^2}$
(3.3) Thermische Bedingungen Arbeitsmittel	Materialien der Oberflächen	keine Verwendung Arbeitsmittel	–
(3.4) Ausgangszustand Fluid-Behälter		nicht erforderlich	

¹⁷⁰ Bezugspunkt: Raumecke der Wand mit Türöffnung sowie der Seitenwand gegenüber der Emissionsfläche.

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(3.5) Bewegungen von Betriebsmitteln	Ausgeführte Bewegungen	keine Verwendung Betriebsmittel	–
(3.6) Zeitlicher Verlauf der Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel		keine Verwendung Betriebsmittel	s
(4) Mensch:			
(4.1) Körperabmessungen (Annahme)	Kopf	x: 0,15 y: 0,10 z: 0,20	m
	Torso	x: 0,40 y: 0,15 z: 0,60	m
	Beine	x: 0,35 y: 0,15 z: 0,95	m
(4.2) Thermische Bedingungen des menschlichen Körpers (vereinheitlichte Annahmen)	Oberflächentemperatur	Kopf: 310,15 Torso: 308,15 Beine: 303,15	K
(5) Arbeitsablauf:			
(5.1) Zeitabhängige Aufenthaltsorte von Beschäftigten (projizierter Körpermittelpunkt)	Position im Arbeitsraum	x: 2,80 y: 2,45 z: 0,00	m
	Orientierung im Arbeitsraum	nicht erforderlich	m
	Atembereich Beschäftigter (Haltung)	stehend (keine Messwerte aus Atembereich)	m
(5.2) Arbeitsorganisation	Zeitdauern des Aufenthalts von Beschäftigten	kein Personenaufenthalt bei Versuchsdurchführung, bei Berücksichtigung: konstanter Aufenthalt	s
	Zeitpunkte Arbeitsaufnahme / -ende	wenn berücksichtigt, gesamte Berechnungsdauer	s
	Zeitbezogene Positionswechsel	keine Positionswechsel	s
(6) Eingabe:			
(6.1) Inhärente Stoffeigenschaften	Aggregatzustand	gasförmig	–
	Molare Masse (Molekulargewicht) emittierter Stoff oder Komponente	28	g/mol
	Dichte des Stoffes bei Emission bzw. Freisetzung in Betrachtungsraum (ggf. nach erfolgtem Phasenübergang)	1,249	kg/m ³ bei T=273,15K

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Temperatur von Gasen bei Emission (Temperatur nach Phasenübergang, ggf. als unmittlere Annahme)	Annahme entsprechend Raumtemperatur	K
	Allgemeine Gaskonstante	8,3145	$J/(mol K)$
(6.2) Stoffspezifische Grenzwerte	Grenzwertkonzept	nicht erforderlich, kein Grenzwertvergleich	–
(7) Ausgabe:			
keine Eingangsgrößen erforderlich			
(8) Umgebungs- und Umwelteinflüsse:			
(8.1) Geometrie des Arbeitsraumes	Länge	4,32	m
	Breite	4,34	m
	Höhe	2,63	m
(8.2) Strömungshindernisse in Arbeitsraum	Länge	keine Strömungshindernisse	m
(8.3) (Oberflächen-) Materialien Bauteile und Strömungshindernisse	Material	Gipskarton	–
	Zuordnung Oberfläche	Raumwände	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,48	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	1.440,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,20	m
	Material	Beton	–
	Zuordnung Oberfläche	Decke	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	1,37	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,88	$kJ/(kg K)$
	Materialdichte	2.100,00	kg/m^3
	Annahme thermische Dicke	0,30	m
	Material	Holz	–
	Zuordnung Oberfläche	Türverschluss, Unterbau Emissionsfläche	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,166	$W/(m K)$
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	2,40	$kJ/(kg K)$
Materialdichte	540,00	kg/m^3	
Annahme thermische Dicke	0,05	m	

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
	Material	Fensterglas	–
	Zuordnung Oberfläche	Fenster	–
	Oberflächentemperaturen (ggf. mit geometrischer Zuordnung)	Annahme: 293,15	K
	Emissionsfaktoren der Wärmestrahlung von Oberflächen	Annahme: 0,9	–
	Wärmeleitfähigkeit verwendeter Oberflächen-Materialien	0,78	W/(m K)
	Wärmespeicherkapazität verwendeter Oberflächen-Materialien	0,84	kJ/(kg K)
	Materialdichte	2.700,00	kg/m ³
	Annahme thermische Dicke	0,10	m
(8.4) Öffnungen des Arbeitsraumes			
Zugangstür	Öffnungsfläche	1,80	m ²
	Position in Umfassungsbauteilen	x=1,73 y=0,00 z=0,00	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen	s
Fenster I	Öffnungsfläche	1,11	m ²
	Position in Umfassungsbauteilen	x=0,69 y=4,36 (Außenwand) z=0,90	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
Fenster II	Öffnungsfläche	1,11	m ²
	Position in Umfassungsbauteilen	x=2,86 y=4,36 (Außenwand) z=0,90	m
	Zeitliches Auftreten	ständig geschlossen (Fensterglas)	s
(8.5) Raumluftechnische Maßnahmen	Fläche	keine Lüftungsmaßnahmen	m ²
(8.6) Stoffeigenschaften Umgebungsatmosphäre	Zusammensetzung Umgebungsatmosphäre (Massenanteile zu Betrachtungsbeginn)	Annahme Standardzusammensetzung	–
	Dichte Umgebungsatmosphäre (ggf. als Ausgangswert zu Beginn der Betrachtung)	modellinterne Abschätzung	kg/m ³
	Temperatur Umgebungsatmosphäre (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	290,55	K
	Umgebungsdruck innerhalb Berechnungsraum (ggf. zu Betrachtungsbeginn als Grundgröße)	100800	Pa
	Luftfeuchtigkeit Umgebungsatmosphäre	40 (Annahme)	%
	Kinematische Viskosität der Umgebungsluft	nicht erforderlich	m ² /s
	Stoffkonzentration in Umgebungsluft (als unmittelbare Annahme)	0	g/m ³

Beschreibung	Eingangsgröße	Größe bzw. Ausprägung	Einheit
(8.7) Thermodynamische Umgebungsbedingungen	Strömungsgeschwindigkeit Umgebungsatmosphäre oberhalb Flüssigkeitsoberfläche (ggf. als unmittelbare Annahme)	nicht erforderlich	m/s
	Wärmestromdichte auf Flüssigkeitsoberfläche aus Betrachtungsraum (ggf. als unmittelbare Annahme)	nicht erforderlich	W/m^2

Tabelle F.3: Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen der Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten [99]

Anhang G

Datenzusammenfassung der Validierungsuntersuchungen

G.1 DGUV-Forschungsprojekt FP 354

G.1.1 Experimentelle Rahmenbedingungen

G.1.1.1 Rahmenbedingungen Untersuchungsschritt 1: Gasfreisetzung Propan

Emissionspunkt 1, Lüftung in Normalbetrieb
Emissionspunkt 2, Lüftung in Normalbetrieb
Emissionspunkt 1, Einschränkung Zuluftflächen
Emissionspunkt 2, Einschränkung Zuluftflächen

Versuchsnummer	$T_{\infty 1, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{\infty 1, \text{Ende}}$ [°C]	$T_{\infty 2, \text{Beginn}}$ [°C]	$T_{\infty 2, \text{Ende}}$ [°C]	$p_{\infty, \text{Beginn}}$ [Pa]	$p_{\infty, \text{Ende}}$ [Pa]	$H_{\text{rel}, \infty}$ [%]	Volstr _{Zu1} [m³/h]	Volstr _{Zu2} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	m_{Em} [g]	aktive FID		
1004	20,0	20,2	19,5	20,0	101500	101500	40	440-460	430-450	450-460	40,00	Atembereich	1	2
1005	20,4	20,6	20,3	20,7	101500	101500	39	435-460	420-440	490-500	41,00	Atembereich	3	4
1006	20,8	21,0	21,0	21,3	101500	101500	39	450-480	430-455	480	40,00	Atembereich	5	-
1007	20,2	20,4	19,8	20,0	101300	101400	50	370-395	370-400	455-470	40,00	Atembereich	3	-
1008	20,6	20,7	20,2	20,4	101400	101400	50	440-470	430-460	490-500	40,00	Atembereich	7	-
1010	20,7	20,8	21,0	21,1	101200	101200	62	380-420	390-420	530-55	36,00	Atembereich	5	-
1011	20,8	20,8	21,3	21,5	101100	101100	62	380-420	390-410	530-540	30,00	Atembereich	3	-
1012	21,0	21,0	21,8	21,9	101100	101100	60	375-400	380-410	530-550	30,00	Atembereich	7	-
1013	21,1	21,2	22,0	22,1	101100	101100	59	375-400	380-410	530-550	36,00	Atembereich	8	-
1014	20,8	21,0	21,0	21,3	100600	100600	64	375-400	380-400	540-550	36,00	Atembereich	1	-
1015	21,0	21,2	21,6	21,9	100600	100600	65	385-405	400-420	460-470	32,00	Atembereich	2	-
1016	21,6	21,7	22,3	22,5	100500	100400	65	410-440	420-440	535-545	36,00	Atembereich	5	-
1017	21,9	22,1	22,8	22,9	100300	100300	65	330-360	370-400	510-540	34,00	Atembereich	3	-
1018	22,4	22,4	23,1	23,2	100300	100300	62	255-280	310-340	520-530	34,00	Atembereich	7	-
1019	20,4	20,7	20,6	21,0	101500	101500	60	360-390	390-420	515-525	34,00	Atembereich	1	2
1020	20,7	20,5	21,2	21,3	101500	101600	59	345-380	390-410	530-550	34,00	Atembereich	1	2
1021	20,7	20,6	21,5	21,5	101600	101600	57	280-300	360-375	545-555	40,00	Atembereich	3	5
1022	21,0	21,0	21,6	21,7	101500	101400	55	330-360	390-420	530-535	36,00	Atembereich	7	8
1023	21,1	21,2	21,8	21,8	101400	101400	54	365-380	390-400	555-570	36,00	Atembereich	7	8

G.1.1.2 Rahmenbedingungen Untersuchungsschritt 2: Verdunstung Isopropanol

Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung abgeschaltet
Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
Verdunstung von 1 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 2, Lüftung in Normalbetrieb

Versuchsnummer	$T_{\infty 1, \text{Beginn}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\infty 1, \text{Ende}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Zu, Beginn}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Zu, Ende}} [^{\circ}\text{C}]$	$p_{\infty, \text{Beginn}} [\text{Pa}]$	$p_{\infty, \text{Ende}} [\text{Pa}]$	$H_{\text{rel}, \infty} [\%]$	$\text{Volstr}_{\text{Zu1}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$\text{Volstr}_{\text{Zu2}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$\text{Volstr}_{\text{Ab-Labor}} [\text{m}^3/\text{h}]$	$m_{\text{Em1}} [\text{g}]$	$m_{\text{Em2}} [\text{g}]$	Person?	aktive FID	
2001	20,4	20,8	20,3	20,7	103200	103100	41	-	-	-	6,00	10,00	ja	Atembereich	1 2
2002	20,5	19,6	20,4	19,4	103200	103200	41	400-415	380-410	565-575	24,00	28,00	ja	Atembereich	1 2
2003	19,4	19,2	18,8	18,7	103200	103100	43	390-410	380-410	580	0,00	24,00	ja	Atembereich	1 2
2004	19,4	19,2	18,7	18,6	103100	103100	44	395-405	380-420	585	34,00	26,00	ja	Atembereich	1 2
2005	19,4	20,0	18,7	19,4	103100	103100	44	-	-	-	2,00	10,00	ja	Atembereich	3 4
2006	18,7	18,2	15,8	15,4	102400	102400	40	395-410	395-415	575-580	36,00	30,00	ja	Atembereich	3 4
2007	18,2	18,0	15,9	15,4	102700	102700	40	385-420	395-405	590	0,00	34,00	ja	Atembereich	3 4
2008	18,1	17,8	16,9	15,6	102400	102400	41	395-420	395-425	585-595	36,00	28,00	ja	Atembereich	3 4
2009	18,1	17,8	17,3	16,0	102600	102500	41	400-420	395-415	575-585	24,00	34,00	nein	Atembereich	3 4
2010	18,1	18,6	18,3	18,9	102600	102500	41	-	-	-	8,00	6,00	ja	Atembereich	5 6
2011	18,7	18,0	17,0	15,7	102500	102500	40	395-410	395-415	585-590	22,00	30,00	ja	Atembereich	5 6
2012	18,0	17,8	17,1	15,3	102500	102500	41	380-405	410-420	575-590	0,00	30,00	ja	Atembereich	5 6
2013	17,8	17,6	16,1	15,2	102500	102500	41	380-415	390-420	570-585	34,00	28,00	ja	Atembereich	5 6
2014	19,6	19,6	20,2	19,7	102300	102300	37	-	-	-	10,00	8,00	ja	Atembereich	7 8
2015	19,2	18,1	17,3	15,1	102300	102300	37	380-410	395-420	585	24,00	26,00	ja	Atembereich	7 8
2016	18,1	17,8	15,5	15,2	102300	102300	37	390-410	400-420	590	0,00	30,00	ja	Atembereich	7 8
2017	17,9	17,6	15,1	15,0	102300	102300	37	405-425	400	585	36,00	28,00	ja	Atembereich	7 8
2018	18,3	17,5	15,3	15,4	1022	102200	37	410	390-415	575	22,00	28,00	nein	Atembereich	7 8

G.1.1.3 Übersicht einzelfallspezifischer Abweichungen

<i>Versuch</i>	<i>Merkmal</i>	<i>Beschreibung</i>
1006	Ausfall FID	Ausfall eines FID aufgrund verbrauchten Brenngases (für Messprinzip erforderlich), Zeitpunkt des Ausfalls bzw. Richtigkeit der noch erfassten Werte unklar
1007 1008 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018	Beschränkung Konzentrationsmessung auf 2 Messpunkte	Beschränkung auf 2 Messpunkte aufgrund des o.g. FID-Ausfalls, Messwertermittlung in Atembereich sowie einzeln an weiterer Position Folge: erhöhte Anzahl an Versuchen, Beschränkung von Konzentrationsvergleichen innerhalb eines Versuchs
1009	Störung der Propan-Emission	Störung der Propan-Emission mit verstärkter Stofffreisetzung, Versuchsabbruch aus Sicherheitsgründen; keine weitere Berücksichtigung für Berechnungen ¹⁷¹ und Wiederholung der Messaufbauten in Versuch 1010
1016	Abfallen der Zuluft-Einschränkung	Lösen bzw. Herunterfallen der zum teilweisen Verschluss der Zuluftöffnung 2 verwendeten Platte nach 452 s des Versuchs, im Anschluss Nutzung der uneingeschränkten Zuluftfläche für Restdauer des Versuchs von 1.348 s
1022	Fehlerhafte Protokollierung Konzentrationsmessung	Keine Dokumentation gemessener Konzentrationen durch Bedienungsfehler, Abbruch und Wiederholung des Versuchs unter gleicher Versuchsnummer ¹⁷²
1022	Abfallen der Zuluft-Einschränkung	Lösen bzw. Herunterfallen der zum teilweisen Verschluss der Zuluftöffnung 1 verwendeten Platte nach 1.013 s des Versuchs, im Anschluss Nutzung der uneingeschränkten Zuluftfläche für Restdauer des Versuchs von 787 s

Tabelle G.1: Besondere Merkmale einzelner Versuche im DGUV-Forschungsprojekt FP 354

¹⁷¹ Auf die Darstellung der Rahmenbedingungen in Anhang G.1.2.1 wird aus diesem Grund verzichtet.

¹⁷² Die in Anhang G.1.2.1 aufgeführten Bedingungen gelten für die Versuchswiederholung.

G.1.2 Modellparametrisierungen

G.1.2.1 Untersuchungsschritt 1: Berechnungs-Eingangswerte zu Propan-Versuchen

Emissionspunkt 1, Lüftung in Normalbetrieb
Emissionspunkt 2, Lüftung in Normalbetrieb
Emissionspunkt 1, Einschränkung Zuluftflächen
Emissionspunkt 2, Einschränkung Zuluftflächen

Versuchsnummer	T _{Raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{Raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{zu1} [m³/h]	Volstr _{zu2} [m³/h]	Volstr _{zu,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,je Raum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ2} [m³/h]	m _{Em} [g]	aktive FID	Bemerkung	
1004-2 (-1 ohne NR)	19,8	19,8	101500	40,00	440	440	880	455	425	213	120	93	40,00	Atembereich	1 2	
1004-3	19,8	19,8	101500	40,00	228	228	455	455	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1004-4	19,8	19,8	101500	40,00	228	228	455	455	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb; Variation Raum: alle Türen geschlossen (ohne NR)
1004-5	19,8	19,8	101500	40,00	150	150	300	300	0	0	0	0	40,00	Atembereich	1 2	Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme;
1005-2 (-1 ohne NR)	20,5	20,5	101500	39,00	440	425	865	495	370	185	104	81	41,00	Atembereich	3 4	
1005-3	20,5	20,5	101500	39,00	250	245	495	495	0	0	0	0	41,00	Atembereich	3 4	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1006-2 (-1 ohne NR)	21,0	21,0	101500	39,00	460	440	900	480	420	210	118	92	40,00	Atembereich	5 -	
1006-3	21,0	21,0	101500	39,00	245	235	480	480	0	0	0	0	40,00	Atembereich	5 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1007-2 (-1 ohne NR)	20,1	20,1	101300	50,00	385	385	770	460	310	155	87	68	40,00	Atembereich	3 -	
1007-3	20,1	20,1	101300	50,00	230	230	460	460	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1007-4	20,1	20,1	101300	50,00	180	180	360	360	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 -	Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme; Variation Raum: alle Türen geschlossen (ohne NR)
1007-5	20,1	20,1	101300	50,00	180	180	360	360	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 -	Variation Lüftung: geringere Zu- /Abluftströme;
1008-2 (-1 ohne NR)	20,3	20,3	101400	50,00	460	445	905	495	410	205	116	89	40,00	Atembereich	7 -	
1008-3	20,3	20,3	101400	50,00	250	245	495	495	0	0	0	89	40,00	Atembereich	7 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1010-1	20,9	20,9	101200	62,00	400	405	805	540	265	133	75	58	36 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	5 -	
1010-2	20,9	20,9	101200	62,00	270	270	540	540	0	0	0	0	36 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	5 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1011-1	21,1	21,1	101100	62,00	400	400	800	540	260	130	73	57	30 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	3 -	
1011-2	21,1	21,1	101100	62,00	270	270	540	540	0	0	0	0	30 (Achtung, Abschätzung!!!)	Atembereich	3 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1012-1	21,5	21,5	101100	60,00	390	400	790	545	245	123	69	54	30,00	Atembereich	7 -	
1012-2	21,5	21,5	101100	60,00	275	270	545	545	0	0	0	0	30,00	Atembereich	7 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1013-1	21,6	21,6	101100	59,00	390	400	790	545	245	123	69	54	36,00	Atembereich	8 -	
1013-2	21,6	21,6	101100	59,00	275	270	545	545	0	0	0	0	36,00	Atembereich	8 -	Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1014-1	21,0	21,0	100600	64,00	385	385	770	545	225	113	63	50	36,00	Atembereich	1 -	

Versuchsnummer	T _{Raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{Raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{zu1} [m³/h]	Volstr _{zu2} [m³/h]	Volstr _{zu,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-Labor} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,je-Raum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Typ2} [m³/h]	m _{Ein} [g]	aktive FID	Bemerkung
1014-2	21,0	21,0	100600	64,00	275	270	545	545	0	0	0	0	36,00	Atembereich	1 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1015-1	21,4	21,4	100600	65,00	395	410	805	460	345	173	97	76	32,00	Atembereich	2 -
1015-2	21,4	21,4	100600	65,00	235	225	460	460	0	0	0	0	32,00	Atembereich	2 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1016-1	22,1	22,1	100500	65,00	425	435	860	535	325	163	92	71	36,00	Atembereich	5 -
1016-2	22,1	22,1	100500	65,00	265	270	535	535	0	0	0	0	36,00	Atembereich	5 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1017-1	22,5	22,5	100300	65,00	335	380	715	530	185	93	52	41	34,00	Atembereich	3 -
1017-2	22,5	22,5	100300	65,00	250	280	530	530	0	0	0	0	34,00	Atembereich	3 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1018-1	22,9	22,9	100300	62,00	265	320	585	525	60	30	17	13	34,00	Atembereich	7 -
1018-2	22,9	22,9	100300	62,00	235	290	525	525	0	0	0	0	34,00	Atembereich	7 - Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1019-1	20,5	20,5	101500	60,00	375	410	785	525	260	130	73	57	34,00	Atembereich	1 2
1019-2	20,5	20,5	101500	60,00	255	270	525	525	0	0	0	0	34,00	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1020-1	21,0	21,0	101500	59,00	360	395	755	545	210	105	59	46	34,00	Atembereich	1 2
1020-2	21,0	21,0	101500	59,00	265	280	545	545	0	0	0	0	34,00	Atembereich	1 2 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1021-1	21,2	21,2	101600	57,00	390	370	760	550	210	105	59	46	40,00	Atembereich	3 5
1021-2	21,2	21,2	101600	57,00	280	270	550	550	0	0	0	0	40,00	Atembereich	3 5 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1022-1	21,4	21,4	101500	55,00	340	405	745	540	205	103	58	45	36,00	Atembereich	7 8
1022-2	21,4	21,4	101500	55,00	260	280	540	540	0	0	0	0	36,00	Atembereich	7 8 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb
1023-1	21,5	21,5	101400	54,00	375	390	765	560	205	103	58	45	36,00	Atembereich	7 8
1023-2	21,5	21,5	101400	54,00	270	290	560	560	0	0	0	0	36,00	Atembereich	7 8 Variation Lüftung: Ausrichtung an gemessenem VStromAb

G.1.2.2 Untersuchungsschritt 2: Berechnungs-Eingangswerte zu Isopropanol-Versuchen

Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung abgeschaltet
Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
Verdunstung von 1 Tablett an Emissionsposition 1, Lüftung in Normalbetrieb
Verdunstung von 2 Tablett an Emissionsposition 2, Lüftung in Normalbetrieb

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Ab-Luft} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp2} [m³/h]	m _{em1} [g]	m _{em2} [g]	m _{em1} [g/(s m²)]	m _{em2} [g/(s m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung		
2001-1	20,4	-	103200	41,00	-	-	-	-	-	-	-	6,00	10,00	0,027777777778	0,04629629630	ja	Atembereich	1	2 Referenzbedingungen	
2001-2	20,4	-	103200	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00414934359	0,00608870771	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung	
2002-1	20,5	15,5	103200	41,00	410	405	815	570	245	123	69	54	24,00	28,00	0,111111111111	0,12962962963	ja	Atembereich	1	2 Referenzbedingungen
2002-2	20,5	15,5	103200	41,00	282	288	570	570	0	0	0	0	24,00	28,00	0,111111111111	0,12962962963	ja	Atembereich	1	2 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2002-3	20,5	15,5	103200	41,00	410	405	815	570	245	123	69	54	-	-	0,00	0,03682192234	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung
2002-4	20,5	15,5	103200	41,00	282	288	570	570	0	0	0	0	-	-	0,02893904923	0,03258090122	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2003-1	19,4	15,5	103200	43,00	400	400	800	580	220	110	62	48	0,00	24,00	0,00	0,111111111111	ja	Atembereich	1	2 Referenzbedingungen
2003-2	19,4	15,5	103200	43,00	290	290	580	580	0	0	0	0	0,00	24,00	0,00	0,111111111111	ja	Atembereich	1	2 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2003-3	19,4	15,5	103200	43,00	400	400	800	580	220	110	62	48	-	-	-	0,04373980569	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung
2003-4	19,4	15,5	103200	43,00	290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	-	0,03144523463	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2004-1	19,4	15,5	103100	44,00	400	405	805	585	220	110	62	48	34,00	26,00	0,15740740741	0,12037037037	ja	Atembereich	1	2 Referenzbedingungen
2004-2	19,4	15,5	103100	44,00	291	294	585	585	0	0	0	0	34,00	26,00	0,15740740741	0,12037037037	ja	Atembereich	1	2 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2004-3	19,4	15,5	103100	44,00	400	405	805	585	220	110	62	48	-	-	0,03582480400	0,03622029928	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung
2004-4	19,4	15,5	103100	44,00	291	294	585	585	0	0	0	0	-	-	0,03660625852	0,03192849896	ja	Atembereich	1	2 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2005-1	19,4	-	103100	44,00	-	-	-	-	-	-	-	-	2,00	10,00	0,00925925926	0,04629629630	ja	Atembereich	3	4 Referenzbedingungen
2005-2	19,4	-	103100	44,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00097667304	0,00623993175	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung
2006-1	18,7	15,6	102400	40,00	405	410	815	575	240	120	67	53	36,00	30,00	0,16666666667	0,13888888889	ja	Atembereich	3	4 Referenzbedingungen
2006-2	18,7	15,6	102400	40,00	285	290	575	575	0	0	0	0	36,00	30,00	0,16666666667	0,13888888889	ja	Atembereich	3	4 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2006-3	18,7	15,6	102400	40,00	405	410	815	575	240	120	67	53	-	-	0,03218230646	0,04191572099	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung
2006-4	18,7	15,6	102400	40,00	285	290	575	575	0	0	0	0	-	-	0,03123932525	0,03431323387	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2006-5-SL	18,7	15,6	102400	40,00	185	185	370	370	0	0	0	0	36,00	30,00	0,16666666667	0,13888888889	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2006-6-ST	18,7	18,7	102400	40,00	285	290	575	575	0	0	0	0	36,00	30,00	0,16666666667	0,13888888889	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2007-1	18,2	15,6	102700	40,00	400	400	800	590	210	105	59	46	0,00	34,00	0,00	0,15740740741	ja	Atembereich	3	4 Referenzbedingungen
2007-2	18,2	15,6	102700	40,00	295	295	590	590	0	0	0	0	0,00	34,00	0,00	0,15740740741	ja	Atembereich	3	4 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2007-3	18,2	15,6	102700	40,00	400	400	800	590	210	105	59	46	-	-	-	0,04569124686	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung
2007-4	18,2	15,6	102700	40,00	295	295	590	590	0	0	0	0	-	-	-	0,03217376562	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2007-5-SL	18,2	15,6	102700	40,00	185	185	370	370	0	0	0	0	0,00	34,00	0,00	0,15740740741	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2007-6-ST	18,2	18,2	102700	40,00	295	295	590	590	0	0	0	0	0,00	34,00	0,00	0,15740740741	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Ab-Luft} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,gr} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,gr,raum} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp01} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp02} [m³/h]	m _{em1} [g]	m _{em2} [g]	m _{em3} [g/(s m²)]	m _{em4} [g/(s m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung	
2008-1	18,1	15,8	102400	41,00	410	410	820	590	230	115	65	50	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	3	4 Referenzbedingungen
2008-2	18,1	15,8	102400	41,00	295	295	590	590	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	3	4 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2008-3	18,1	15,8	102400	41,00	410	410	820	590	230	115	65	50	-	-	0,03029497529	0,03360275409	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung
2008-4	18,1	15,8	102400	41,00	295	295	590	590	0	0	0	0	-	-	0,03775515910	0,03445810349	ja	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2008-5-SL	18,1	15,8	102400	41,00	185	185	370	370	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2008-6-ST	18,1	18,1	102400	41,00	295	295	590	590	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	3	4 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2009-1	18,1	16,0	102600	41,00	405	405	810	580	230	115	65	50	24,00	34,00	0,11111111111	0,15740740741	nein	Atembereich	3	4 Referenzbedingungen
2009-2	18,1	16,0	102600	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	24,00	34,00	0,11111111111	0,15740740741	nein	Atembereich	3	4 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2009-3	18,1	16,0	102600	41,00	405	405	810	580	230	115	65	50	-	-	0,04204011881	0,05322474372	nein	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung
2009-4	18,1	16,0	102600	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	0,02967956298	0,03641329839	nein	Atembereich	3	4 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2009-5-SL	18,1	16,0	102600	41,00	185	185	370	370	0	0	0	0	24,00	34,00	0,11111111111	0,15740740741	nein	Atembereich	3	4 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2009-6-ST	18,1	18,1	102600	41,00	290	290	580	580	0	0	0	0	24,00	34,00	0,11111111111	0,15740740741	nein	Atembereich	3	4 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2010-1	18,2	-	102600	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	8,00	6,00	0,03703703704	0,02777777778	ja	Atembereich	5	6 Referenzbedingungen
2010-2	18,2	-	102600	41,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00596548104	0,00613105579	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung
2011-1	18,7	15,7	102500	40,00	405	400	805	590	215	108	61	47	22,00	30,00	0,10185185185	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Referenzbedingungen
2011-2	18,7	15,7	102500	40,00	297	293	590	590	0	0	0	0	22,00	30,00	0,10185185185	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2011-3	18,7	15,7	102500	40,00	405	400	805	590	215	108	61	47	-	-	0,02998476224	0,04613356746	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung
2011-4	18,7	15,7	102500	40,00	297	293	590	590	0	0	0	0	-	-	0,02863291566	0,03119462626	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2011-5-SL	18,7	15,7	102500	40,00	200	200	400	400	0	0	0	0	22,00	30,00	0,10185185185	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2011-6-ST	18,7	18,7	102500	40,00	297	293	590	590	0	0	0	0	22,00	30,00	0,10185185185	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2012-1	18,0	15,4	102500	41,00	395	410	805	585	220	110	62	48	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Referenzbedingungen
2012-2	18,0	15,4	102500	41,00	285	300	585	585	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2012-3	18,0	15,4	102500	41,00	395	410	805	585	220	110	62	48	-	-	-	0,05614499962	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung
2012-4	18,0	15,4	102500	41,00	285	300	585	585	0	0	0	0	-	-	-	0,03739354533	ja	Atembereich	5	6 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2012-5-SL	18,0	15,4	102500	41,00	200	200	400	400	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft; Anpassung Zuluft an Abluft
2012-6-ST	18,0	18,0	102500	41,00	285	300	585	585	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	5	6 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft-T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Ab-Luft} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ges} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp1} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp2} [m³/h]	m _{em1} [g]	m _{em2} [g]	m _{em} [g/(s m²)]	m _{em} [g/(s m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung				
2013-1	17,8	15,2	102500	41,00		400	400	800	580	220	110	62	48	34,00	28,00	0,15740740741	0,12962962963	ja	Atembereich	5	6	Referenzbedingungen
2013-2	17,8	15,2	102500	41,00		290	290	580	580	0	0	0	0	34,00	28,00	0,15740740741	0,12962962963	ja	Atembereich	5	6	Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2013-3	17,8	15,2	102500	41,00		400	400	800	580	220	110	62	48	-	-	0,03101620040	0,03288931544	ja	Atembereich	5	6	mit Emissionsrechnung
2013-4	17,8	15,2	102500	41,00		290	290	580	580	0	0	0	0	-	-	0,03639254744	0,03032851870	ja	Atembereich	5	6	mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2013-5-SL	17,8	15,2	102500	41,00		200	200	400	400	0	0	0	0	34,00	28,00	0,15740740741	0,12962962963	ja	Atembereich	5	6	Sensitivität Lüftung: Herabsetzung Abluft, Anpassung Zuluft an Abluft
2013-6-ST	17,8	17,8	102500	41,00		290	290	580	580	0	0	0	0	34,00	28,00	0,15740740741	0,12962962963	ja	Atembereich	5	6	Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft- T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2014-1	19,6	-	102300	37,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,00	8,00	0,04629629630	0,03703703704	ja	Atembereich	7	8	Referenzbedingungen
2014-2	19,6	-	102300	37,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00464074255	0,00634690810	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung
2015-1	19,2	15,1	102300	37,00		400	415	815	585	230	115	65	50	24,00	26,00	0,11111111111	0,12037037037	ja	Atembereich	7	8	Referenzbedingungen
2015-2	19,2	15,1	102300	37,00		285	300	585	585	0	0	0	0	24,00	26,00	0,11111111111	0,12037037037	ja	Atembereich	7	8	Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2015-3	19,2	15,1	102300	37,00		400	415	815	585	230	115	65	50	-	-	0,03436800054	0,03589515720	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung
2015-4	19,2	15,1	102300	37,00		285	300	585	585	0	0	0	0	-	-	0,02966283201	0,02892764870	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2015-5-SL	19,2	15,1	102300	37,00		210	210	420	420	0	0	0	0	24,00	26,00	0,11111111111	0,12037037037	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Lüftung: Herabsetzung Abluft, Anpassung Zuluft an Abluft
2015-6-ST	19,2	19,2	102300	37,00		285	300	585	585	0	0	0	0	24,00	26,00	0,11111111111	0,12037037037	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft- T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2016-1	18,1	15,0	102300	37,00		400	415	815	590	225	113	64	49	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	7	8	Referenzbedingungen
2016-2	18,1	15,0	102300	37,00		287	303	590	590	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	7	8	Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2016-3	18,1	15,0	102300	37,00		400	415	815	590	225	113	64	49	-	-	-	0,03557714801	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung
2016-4	18,1	15,0	102300	37,00		287	303	590	590	0	0	0	0	-	-	-	0,03509899655	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2016-5-SL	18,1	15,0	102300	37,00		210	210	420	420	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Lüftung: Herabsetzung Abluft, Anpassung Zuluft an Abluft
2016-6-ST	18,1	18,1	102300	37,00		287	303	590	590	0	0	0	0	0,00	30,00	0,00	0,13888888889	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft- T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2
2017-1	17,9	15,0	102300	37,00		415	400	815	585	230	115	65	50	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	7	8	Referenzbedingungen
2017-2	17,9	15,0	102300	37,00		300	285	585	585	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	7	8	Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2017-3	17,9	15,0	102300	37,00		415	400	815	585	230	115	65	50	-	-	0,03127950237	0,03354911803	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung
2017-4	17,9	15,0	102300	37,00		300	285	585	585	0	0	0	0	-	-	0,03651800133	0,03261306824	ja	Atembereich	7	8	mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung: Anpassung Zuluft an Abluft
2017-5-SL	17,9	15,0	102300	37,00		210	210	420	420	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Lüftung: Herabsetzung Abluft, Anpassung Zuluft an Abluft
2017-6-ST	17,9	17,9	102300	37,00		300	285	585	585	0	0	0	0	36,00	28,00	0,16666666667	0,12962962963	ja	Atembereich	7	8	Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft- T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2

Versuchsnummer	T _{raum} [°C]	T _{Zuluft} [°C]	P _{raum} [Pa]	H _{rel} [%]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zul} [m³/h]	Volstr _{Zuluft} [m³/h]	Volstr _{Ab-Luft} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,ger} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,gr} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp01} [m³/h]	Volstr _{Ab-NR,Tp02} [m³/h]	m _{end1} [g]	m _{end2} [g]	m _{end1} [g/(s m²)]	m _{end2} [g/(s m²)]	Person?	aktive FID	Bemerkung	
2018-1	18,3	15,0	102200	37,00	410	405	815	575	240	120	67	53	22,00	28,00	0,10185185185	0,12962962963	nein	Atembereich	7	8 Referenzbedingungen
2018-2	18,3	15,0	102200	37,00	290	285	575	575	0	0	0	0	22,00	28,00	0,10185185185	0,12962962963	nein	Atembereich	7	8 Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2018-3	18,3	15,0	102200	37,00	410	405	815	575	240	120	67	53	-	-	0,03881186207	0,04579487684	nein	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung
2018-4	18,3	15,0	102200	37,00	290	285	575	575	0	0	0	0	-	-	0,02922113303	0,03297152241	nein	Atembereich	7	8 mit Emissionsrechnung; Variation Lüftung; Anpassung Zuluft an Abluft
2018-5-SL	18,3	15,0	102200	37,00	210	210	420	420	0	0	0	0	22,00	28,00	0,10185185185	0,12962962963	nein	Atembereich	7	8 Sensitivität Lüftung; Herabsetzung Abluft, Anpassung Zuluft an Abluft
2018-6-ST	18,3	18,3	102200	37,00	290	285	575	575	0	0	0	0	22,00	28,00	0,10185185185	0,12962962963	nein	Atembereich	7	8 Sensitivität Temperaturrelation: Zuluft- T = Raum-T bei Variation Lüftung gem. 2

G.2 Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor

G.2.1 Experimentelle Rahmenbedingungen

Name Messung	Abklingen-Ethylacetat	Abklingen-Ethylacetat2	Abklingen-Propylen	Abklingen-Propylen-mit ohne-Lüfter	Ethylacetat-Expolab5	Luftwechsel- Expolab_KNV
Versuchsstoff	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	Propylen (C ₃ H ₆)	Propylen (C ₃ H ₆)	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	n-Butanol (C ₄ H ₁₀ O)
T _∞ [K]	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15	295,15
H _{rel} [%]	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50	40-50
p _{Raum} [Pa]	101315,00	101315,00	101315,00	101315,00	101315,00	101315,00
A _{Zu,ges,vorh} [m ²]	0,04235	0,04235	0,04235	0,04235	0,04235	0,04235
n _{Off,vor} [-]	11	11	11	11	11	11
A _{Ab,ges,vorh} [m ²]	0,0682	0,0682	0,0682	0,0682	0,0682	0,0682
λ [h ⁻¹]	10,93	10,93	11,18	11,18	10,93	11,89
Volst _{λ,ges,T∞} [m ³ /h]	312,237	312,237	319,379	319,379	312,237	339,662
c _{t=0} [ppm]	500,00	565,00	1,00	0,48	5,73	1,92
c _{t=Ende} [ppm]	ca. 1	ca. 6	ca. 0	0,45	ca. 0,01	ca. 527
Ventilatorbetrieb	ja	ja	ja	teilweise	ja	ja
Personenaufenthalt	-	-	-	-	-	-

G.2.2 Modellparametrisierungen

Name Messung	Name FDS	Betrachtungsart	T _w [K]	H _{rel} [%]	P _{Barom} [Pa]	n _{Offvent} [-]	A _{Zu,gen,FDS} [m ²]	n _{OffFDS} [-]	Volstr _{Zu,gen,Tm} [m ³ /h]	λ [h ⁻¹]	mStr _{Zu,gen} [kg/s]	mStrDichte _{Zu,gen} [kg/(m ² s)]	A _{Ab,gen,FDS} [m ²]
Abklingen-Ethylacetat	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk_295KVent	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
Abklingen-Ethylacetat2	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk2_295KVent	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk2_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
Abklingen-Ethylacetat2	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk2_288KVent	Sensitivität	288,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C4H8O2-Abk2_295KVH55	Sensitivität	295,15	55	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
Abklingen-Propylen	Validierung_Expo-Labor_C3H6-Abk_295KVent	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C3H6-Abk_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
Abklingen-Propylen	Validierung_Expo-Labor_C3H6-Abk_295KVentmP	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C3H6-Abk_295KmP	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter	Validierung_Expo-Labor_C3H6-AbAn_295KV	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C3H6-AbAn_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter	Validierung_Expo-Labor_C3H6-AbAn_295KVmP	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
	Validierung_Expo-Labor_C3H6-AbAn_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	319,379	11,18	0,10608	1,92868889	0,006
Ethylacetat-Expolab5	Val_Expo-Labor_C4H8O2-An_295KVent	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
	Val_Expo-Labor_C4H8O2-An_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
Ethylacetat-Expolab5	Val_Expo-Labor_C4H8O2-An_295KVent_mP	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	312,237	10,93	0,10371	1,88556079	0,006
	Validierung-Expo-Labor_C4H100-Abk_295KVent	gem. Messung	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	339,662	11,89	0,11281	2,05117271	0,006
Luftwechsel-Expolab_KNV	Validierung-Expo-Labor_C4H100-Abk_295K	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	339,662	11,89	0,11281	2,05117271	0,006
	Validierung-Expo-Labor_C4H100-Abk_295KVent_mP	Sensitivität	295,15	40	101315,00	11	0,055	11	339,662	11,89	0,11281	2,05117271	0,006
Name Messung	Volstr _{Ab,gen,FDS} [m ³ /s]	Stoffname	ρ _{l,m} [kg/m ³]	c _{l,0} [ppm]	Massenanteil _{Zu,0} [-]	mStr _{l,m} [kg/s]	mStrDichte _{Zu,0} [kg/(m ² s)]	mStrDichte _{Zu,0,m} [kg/(m ² s)]	A _{Ventilator} [m ²]	VStr _{Ventilator} [m ³ /s]	Person?	T _{Kopf} [°C]	T _{Beine} [°C]
Abklingen-Ethylacetat	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	500,00	0,00034468676	0,000003916	0,00071206	1,88484872	0,075	3,00	nein		
	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	500,00	0,00034468676	0,000003916	0,00071206	1,88484872		3,00	nein		
Abklingen-Ethylacetat2	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	565,00	0,00042679283	0,00004425	0,00080463	1,88475615	0,075	3,00	nein		
	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	565,00	0,00042679283	0,00004425	0,00080463	1,88475615		3,00	nein		
Abklingen-Ethylacetat2	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	565,00	0,00042679283	0,00004425	0,00080463	1,88475615	0,075	3,00	nein		
	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	565,00	0,00042679283	0,00004425	0,00080463	1,88475615		3,00	nein		
Abklingen-Propylen	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	1,00	0,00000147832	0,00000016	0,00000285	1,92868604	0,075	3,00	nein		
	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	1,00	0,00000147832	0,00000016	0,00000285	1,92868604		3,00	nein		
Abklingen-Propylen	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	1,00	0,00000147832	0,00000016	0,00000285	1,92868604	0,075	3,00	ja	37,00	30,00
	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	1,00	0,00000147832	0,00000016	0,00000285	1,92868604		3,00	ja	37,00	30,00
Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	0,48	0,00000070960	0,00000008	0,00000137	1,92868889	0,075	3,00	nein		
	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	0,48	0,00000070960	0,00000008	0,00000137	1,92868889		3,00	nein		
Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	0,48	0,00000070960	0,00000008	0,00000137	1,92868889	0,075	3,00	ja	37,00	30,00
	0,088716410	Propylen (C ₃ H ₆)	1,7676	0,48	0,00000070960	0,00000008	0,00000137	1,92868889		3,00	ja	37,00	30,00
Ethylacetat-Expolab5	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	5,73	0,00000433003	0,00004073	0,00074055	1,88482024	0,075	3,00	nein		
	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	5,73	0,00000433003	0,00004073	0,00074055	1,88482024		3,00	nein		
Ethylacetat-Expolab5	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	5,73	0,00000433003	0,00004073	0,00074055	1,88482024	0,075	3,00	ja	37,00	30,00
	0,086732586	Ethylacetat (C ₄ H ₈ O ₂)	0,9031	5,73	0,00000433003	0,00004073	0,00074055	1,88482024		3,00	ja	37,00	30,00
Luftwechsel-Expolab_KNV	0,094350453	n-Butanol (C ₄ H ₁₀ O)	0,8100	1,92	0,00000129185	0,00000015	0,00000265	2,05701106	0,075	3,00	nein		
	0,094350453	n-Butanol (C ₄ H ₁₀ O)	0,8100	1,92	0,00000129185	0,00000015	0,00000265	2,05701106		3,00	nein		
Luftwechsel-Expolab_KNV	0,094350453	n-Butanol (C ₄ H ₁₀ O)	0,8100	1,92	0,00000129185	0,00000015	0,00000265	2,05701106		3,00	ja	37,00	30,00
	0,094350453	n-Butanol (C ₄ H ₁₀ O)	0,8100	1,92	0,00000129185	0,00000015	0,00000265	2,05701106		3,00	ja	37,00	30,00

G.3 Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten - Modellparametrisierungen

Szenario	T_{Raum} [°C]	p_{Raum} [Pa]	H_{rel} [%]	$A_{em,FDS}$ [m ²]	$m_{em,FDS}$ [g/(s m ²)]	Person?	T_{Kopf} [°C]	T_{Torso} [°C]	T_{Beine} [°C]
001oP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,659556	nein			
001mP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,659556	ja	37,00	35,00	30,00
002oP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,461689	nein			
002mP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,461689	ja	37,00	35,00	30,00
003oP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,395733	nein			
003mP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,395733	ja	37,00	35,00	30,00
004oP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,329778	nein			
004mP	17,4	100800	40,00	0,0625	0,329778	ja	37,00	35,00	30,00

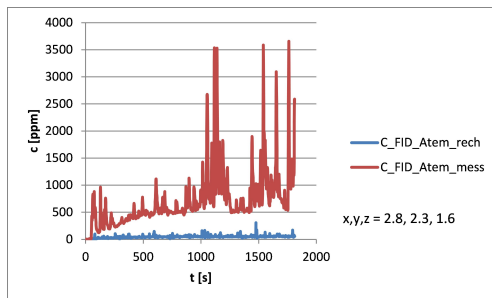
Anhang H

Ergebnisdarstellungen der Validierungsuntersuchungen

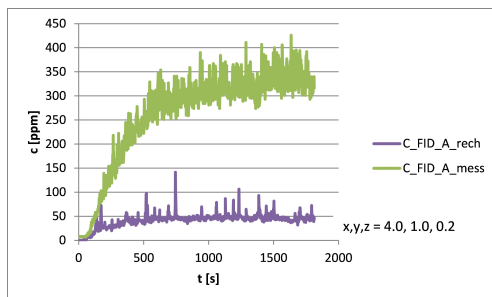
H.1 DGUV-Forschungsprojekt FP 354

H.1.1 Untersuchungsschritt 1: Gasfreisetzung Propan

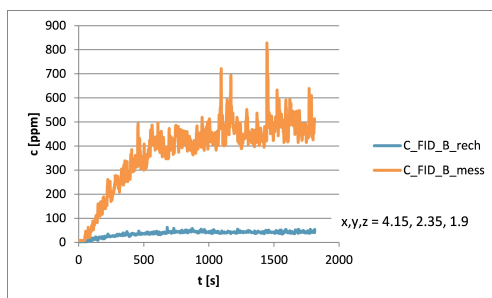
Versuch 1019-1



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,95115
Inneres Produkt $\cos =$ 0,82648
Projektionskoeffizient $a =$ 13,81291

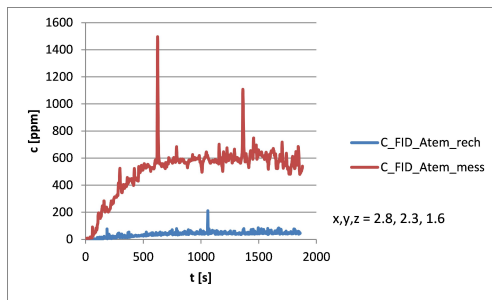


Relative Abweichung $L_2 =$ 0,84856
Inneres Produkt $\cos =$ 0,97499
Projektionskoeffizient $a =$ 6,24096

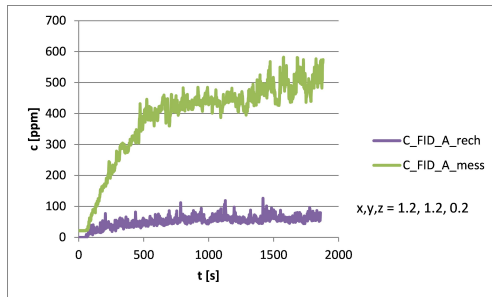


Relative Abweichung $L_2 =$ 0,90610
Inneres Produkt $\cos =$ 0,98639
Projektionskoeffizient $a =$ 10,34637

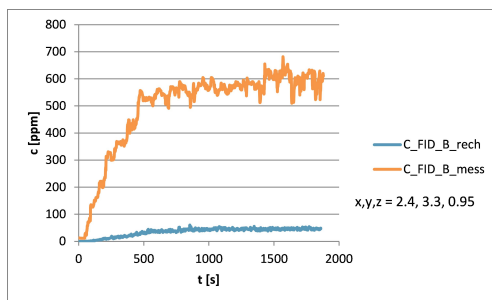
Versuch 1021-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,92463$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95832$
 Projektionskoeffizient $a = 12,14074$



Relative Abweichung $L_2 = 0,86873$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97999$
 Projektionskoeffizient $a = 7,29289$



Relative Abweichung $L_2 = 0,92667$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98765$
 Projektionskoeffizient $a = 13,28964$

H.1.2 Untersuchungsschritt 2: Verdunstung Isopropanol

H.1.2.1 Emissionsabschätzung

Szenario	$m_{Mess,A1,30min}$ [g]	$m_{Rech,A1,30min}$ [g]	Faktor Abweichung	$m_{Mess,A2,30min}$ [g]	$m_{Rech,A2,30min}$ [g]	Faktor Abweichung
2001-1	6,00	0,90	6,69	10,00	1,32	7,60
2002-1	24,00	0,00	–	28,00	7,95	3,52
2002-2	24,00	6,25	3,84	28,00	7,04	3,98
2003-1	–	–	–	24,00	9,45	2,54
2003-2	–	–	–	24,00	6,79	3,53
2004-1	34,00	7,74	4,39	26,00	7,82	3,32
2004-2	34,00	7,91	4,30	26,00	6,90	3,77
2005-1	2,00	0,21	9,48	10,00	1,35	7,42
2006-1	36,00	6,95	5,18	30,00	9,05	3,31
2006-2	36,00	6,75	5,34	30,00	7,41	4,05
2007-1	–	–	–	34,00	9,87	3,45
2007-2	–	–	–	34,00	6,95	4,89
2008-1	36,00	6,54	5,50	28,00	7,26	3,86
2008-2	36,00	8,16	4,41	28,00	7,44	3,76
2009-1	24,00	9,08	2,64	34,00	11,50	2,96
2009-2	24,00	6,41	3,74	34,00	7,87	4,32
2010-1	8,00	1,29	6,21	6,00	1,32	4,53
2011-1	22,00	6,48	3,40	30,00	9,96	3,01
2011-2	22,00	6,18	3,56	30,00	6,74	4,45
2012-1	–	–	–	30,00	12,13	2,47
2012-2	–	–	–	30,00	8,08	3,71
2013-1	34,00	6,70	5,08	28,00	7,10	3,94
2013-2	34,00	7,86	4,33	28,00	6,55	4,27
2014-1	10,00	1,00	9,98	8,00	1,37	5,84
2015-1	24,00	7,42	3,23	26,00	7,75	3,35
2015-2	24,00	6,41	3,74	26,00	6,25	4,14
2016-1	–	–	–	30,00	7,68	3,90
2016-2	–	–	–	30,00	7,58	3,96
2017-1	36,00	6,76	5,33	28,00	7,25	3,86
2017-2	36,00	7,89	4,56	28,00	7,04	3,98
2018-1	22,00	8,38	2,62	28,00	9,89	2,83
2018-2	22,00	6,31	3,49	28,00	7,12	3,93

Tabelle H.1: Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs-Gesamtmassen (gerundet)

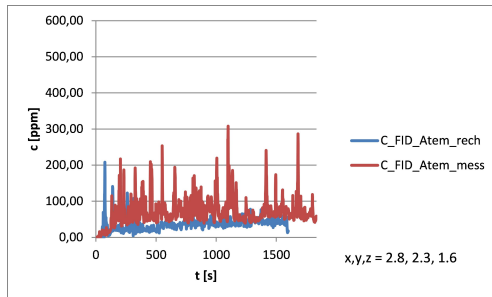
Szenario	$\dot{m}_{Mess,A1}$ [g/(s m ²)]	$\dot{m}_{Rech,A1}$ [g/(s m ²)]	$\dot{m}_{Mess,A2}$ [g/(s m ²)]	$\dot{m}_{Rech,A2}$ [g/(s m ²)]
2001-1	0,0278	0,0042	0,0463	0,0061
2002-1	0,1111	0,00	0,1296	0,0368
2002-2	0,1111	0,0289	0,1296	0,0326
2003-1	–	–	0,1111	0,0437
2003-2	–	–	0,1111	0,0315
2004-1	0,1574	0,0358	0,1204	0,0362
2004-2	0,1574	0,0366	0,1204	0,0319
2005-1	0,0093	0,0010	0,04630	0,0062
2006-1	0,1667	0,0322	0,1389	0,0419
2006-2	0,1667	0,0312	0,1389	0,0343
2007-1	–	–	0,1574	0,0457
2007-2	–	–	0,1574	0,0322
2008-1	0,1667	0,0303	0,1296	0,0336
2008-2	0,1667	0,0378	0,1296	0,0345

Szenario	$\dot{m}_{Mess,A1} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Rech,A1} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Mess,A2} [g/(s m^2)]$	$\dot{m}_{Rech,A2} [g/(s m^2)]$
2009-1	0,1111	0,0420	0,1574	0,0532
2009-2	0,1111	0,0297	0,1574	0,0364
2010-1	0,3704	0,0060	0,0278	0,0061
2011-1	0,1019	0,0230	0,1389	0,0461
2011-2	0,1019	0,0286	0,1389	0,0312
2012-1	–	–	0,1389	0,0562
2012-2	–	–	0,1389	0,0374
2013-1	0,1574	0,0310	0,1296	0,0329
2013-2	0,1574	0,0303	0,1296	0,0303
2014-1	0,0463	0,0046	0,0370	0,0064
2015-1	0,1111	0,0344	0,1204	0,0359
2015-2	0,1111	0,0297	0,1204	0,0289
2016-1	–	–	0,1389	0,0356
2016-2	–	–	0,1389	0,0351
2017-1	0,1667	0,0313	0,1296	0,0336
2017-2	0,1667	0,0365	0,1296	0,0326
2018-1	0,1019	0,0388	0,1296	0,0458
2018-2	0,1019	0,0292	0,1296	0,0330

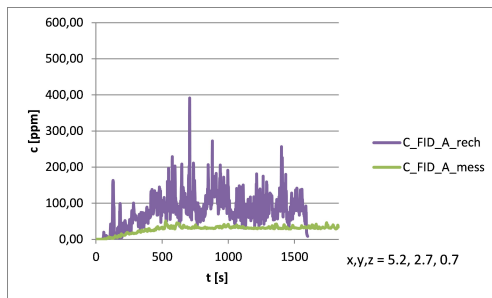
Tabelle H.2: Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs-Massenströme

H.1.2.2 Konzentrationsverläufe

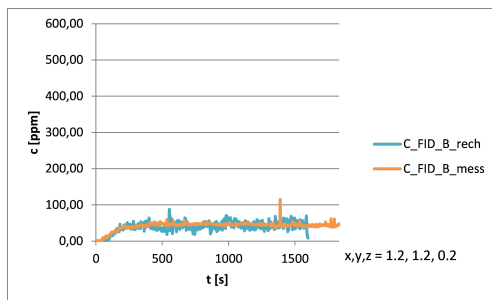
Versuch 2006-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,65376$
 Inneres Produkt $\cos = 0,81705$
 Projektionskoeffizient $a = 1,60563$

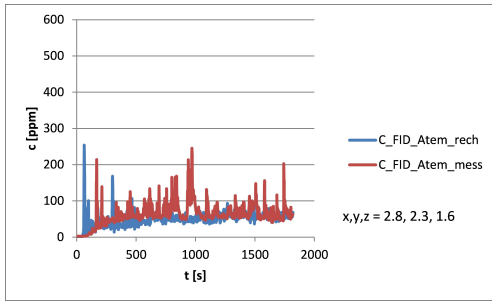


Relative Abweichung $L_2 = 2,26755$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92292$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29229$

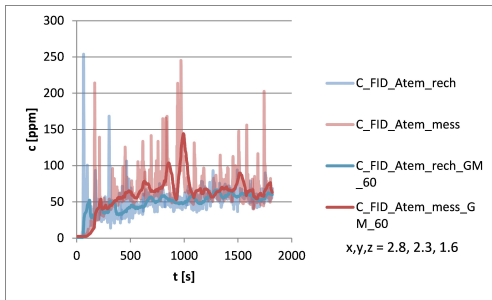
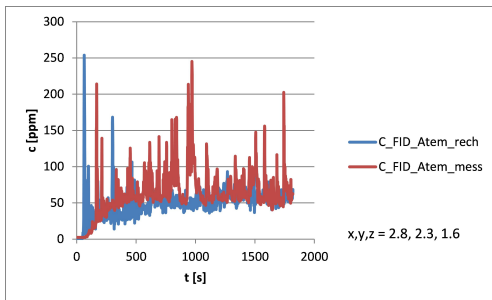


Relative Abweichung $L_2 = 0,22170$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97517$
 Projektionskoeffizient $a = 0,98396$

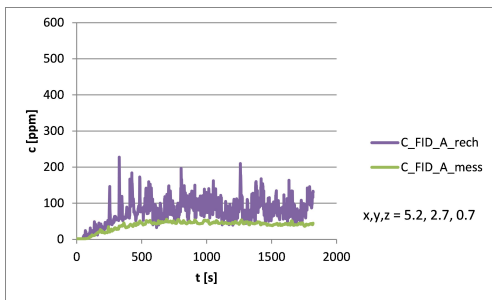
Versuch 2008-1



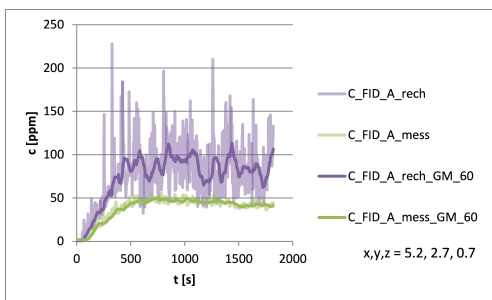
Relative Abweichung $L_2 = 0,49517$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87524$
 Projektionskoeffizient $a = 1,13778$



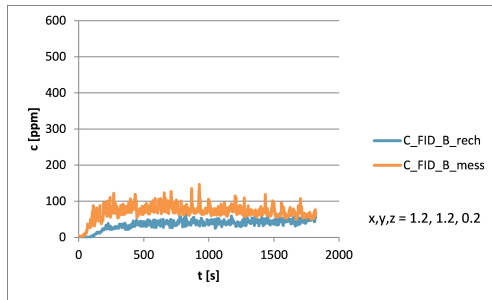
Relative Abweichung $L_2 = 0,35062$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95556$
 Projektionskoeffizient $a = 1,24791$



Relative Abweichung $L_2 = 1,11645$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95930$
 Projektionskoeffizient $a = 0,47037$

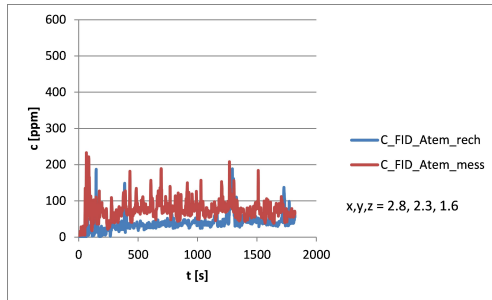


Relative Abweichung $L_2 = 0,97928$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99244$
 Projektionskoeffizient $a = 0,50532$

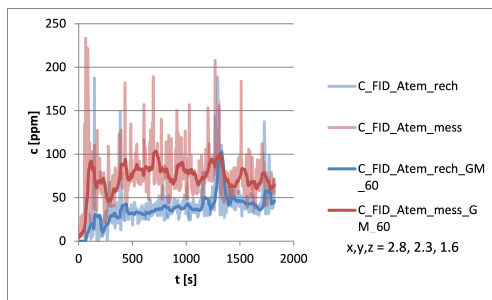


Relative Abweichung $L_2 =$ 0,51170
Inneres Produkt $\cos =$ 0,95231
Projektionskoeffizient $a =$ 1,75853

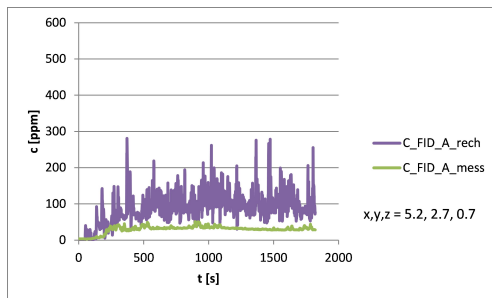
Versuch 2009-1



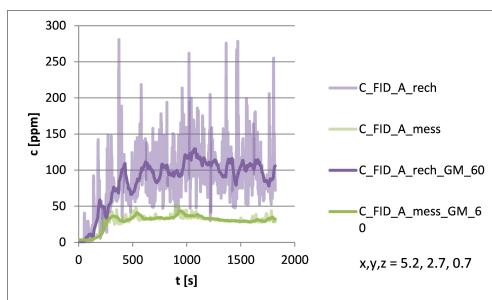
Relative Abweichung $L_2 = 0,59459$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85745$
 Projektionskoeffizient $a = 1,53246$



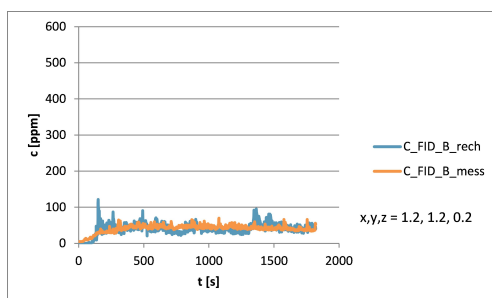
Relative Abweichung $L_2 = 0,51997$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94314$
 Projektionskoeffizient $a = 1,73601$



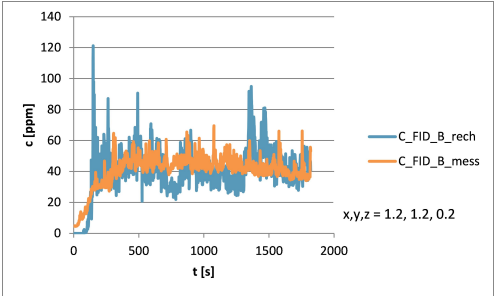
Relative Abweichung $L_2 = 2,20348$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93098$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29993$



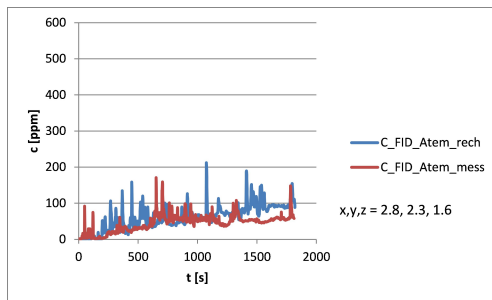
Relative Abweichung $L_2 = 2,00082$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98066$
 Projektionskoeffizient $a = 0,32998$



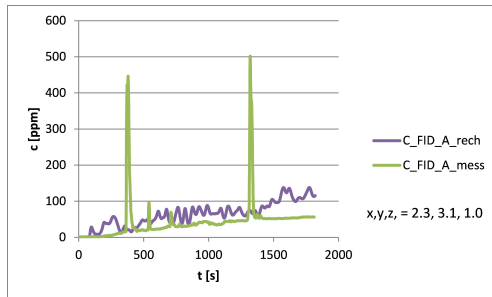
Relative Abweichung $L_2 = 0,31822$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95100$
 Projektionskoeffizient $a = 0,92665$



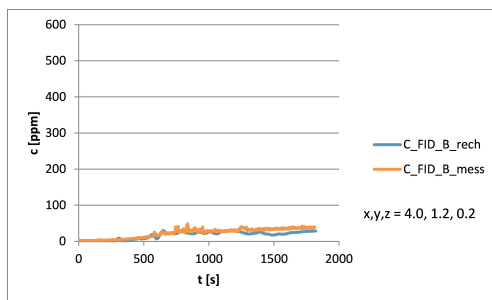
Versuch 2010-1



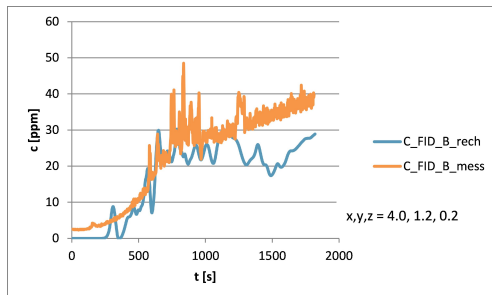
Relative Abweichung $L_2 = 0,66763$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89163$
 Projektionskoeffizient $a = 0,64504$



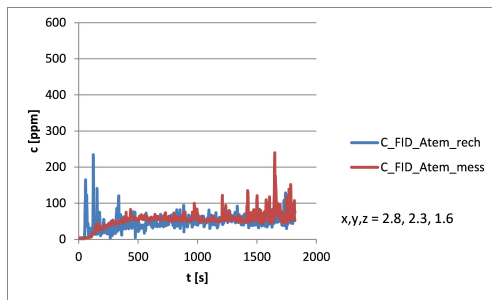
Relative Abweichung $L_2 = 0,89683$
 Inneres Produkt $\cos = 0,58310$
 Projektionskoeffizient $a = 0,60552$



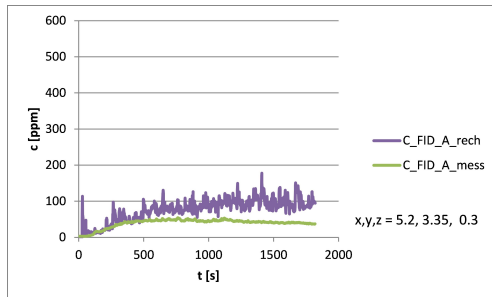
Relative Abweichung $L_2 = 0,31059$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97524$
 Projektionskoeffizient $a = 1,28803$



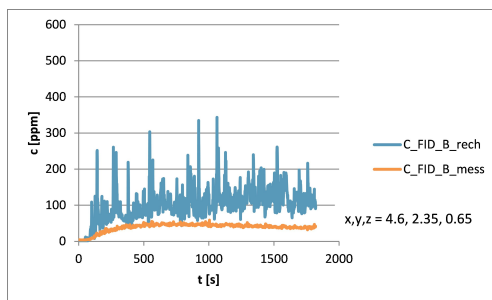
Versuch 2017-1



Relative Abweichung $L_2 = 0,44596$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89534$
 Projektionskoeffizient $a = 1,02586$

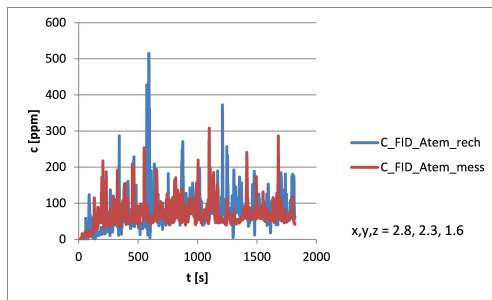


Relative Abweichung $L_2 = 1,06579$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96472$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48297$

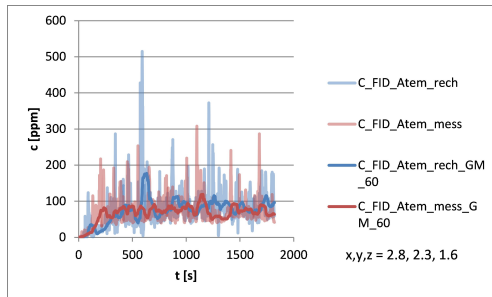


Relative Abweichung $L_2 = 1,83618$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94041$
 Projektionskoeffizient $a = 0,34261$

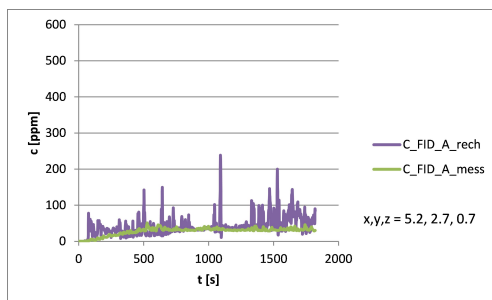
Versuch 2006-2



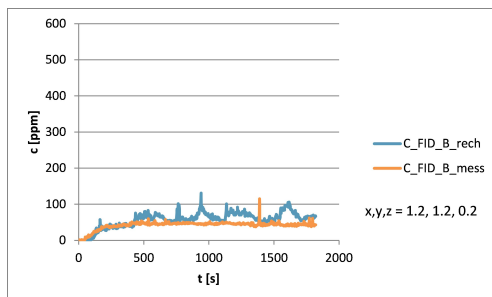
Relative Abweichung $L_2 = 0,75553$
 Inneres Produkt $\cos = 0,77195$
 Projektionskoeffizient $a = 0,65404$



Relative Abweichung $L_2 = 0,41841$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92926$
 Projektionskoeffizient $a = 0,82546$

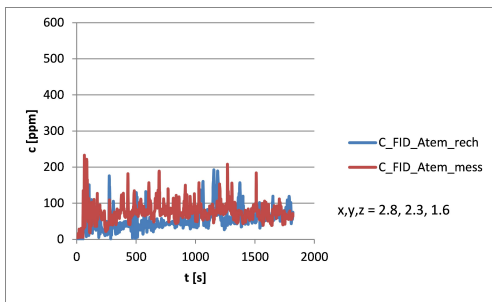


Relative Abweichung $L_2 = 0,89609$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86054$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53859$

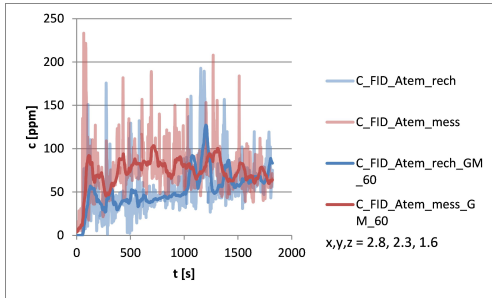


Relative Abweichung $L_2 = 0,51078$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96898$
 Projektionskoeffizient $a = 0,68431$

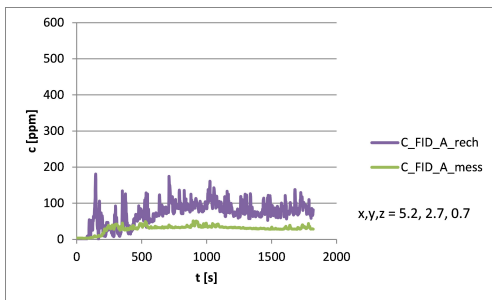
Versuch 2009-2



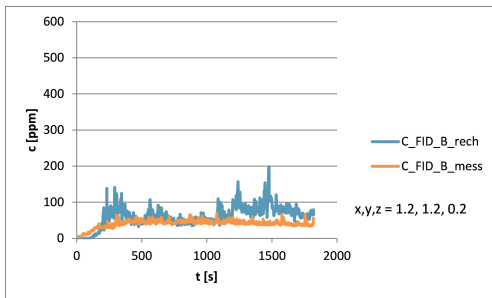
Relative Abweichung $L_2 = 0,53295$
 Inneres Produkt $\cos = 0,84908$
 Projektionskoeffizient $a = 1,09056$



Relative Abweichung $L_2 = 0,40120$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93302$
 Projektionskoeffizient $a = 1,23481$

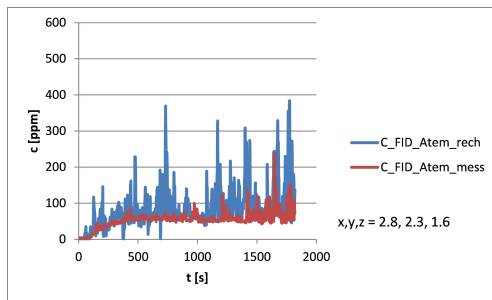


Relative Abweichung $L_2 = 1,60110$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93858$
 Projektionskoeffizient $a = 0,37512$

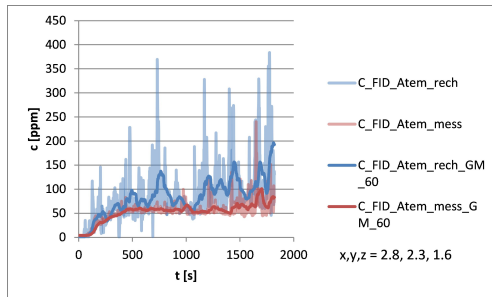


Relative Abweichung $L_2 = 0,77156$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93023$
 Projektionskoeffizient $a = 0,57817$

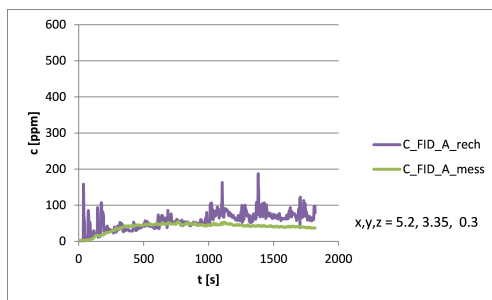
Versuch 2017-2



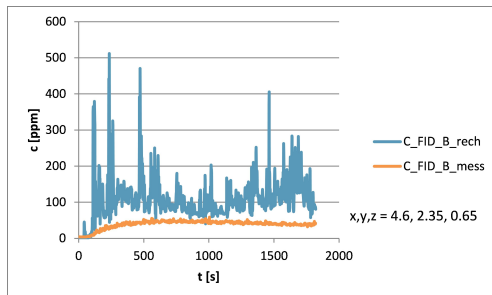
Relative Abweichung $L_2 = 0,99021$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87336$
 Projektionskoeffizient $a = 0,52324$



Relative Abweichung $L_2 = 0,69537$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97244$
 Projektionskoeffizient $a = 0,59748$

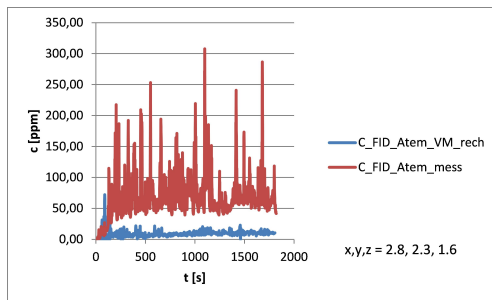


Relative Abweichung $L_2 = 0,64962$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93802$
 Projektionskoeffizient $a = 0,63062$

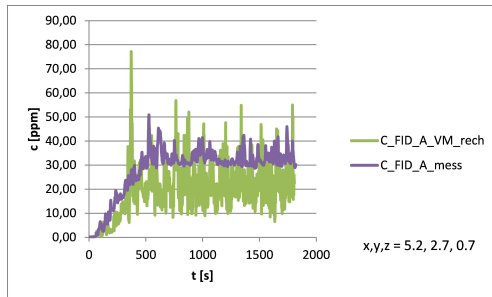


Relative Abweichung $L_2 = 2,14158,$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88834$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29809$

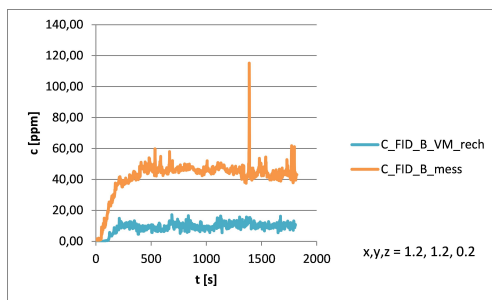
Versuch 2006-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,68093$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82980$
 Projektionskoeffizient $a = 1,88751$

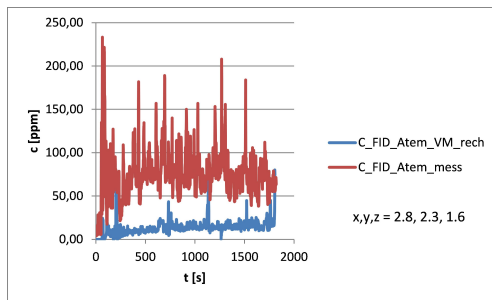


Relative Abweichung $L_2 = 1,73562$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93276$
 Projektionskoeffizient $a = 0,35459$

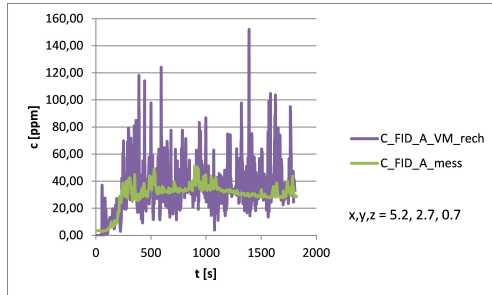


Relative Abweichung $L_2 = 0,23245$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98057$
 Projektionskoeffizient $a = 1,14566$

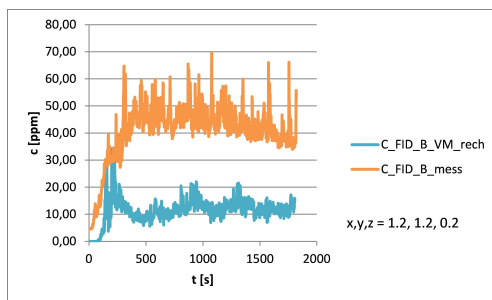
Versuch 2009-3



Relative Abweichung $L_2 = 0,84258$
 Inneres Produkt $cos = 0,83445$
 Projektionskoeffizient $a = 4,23406$

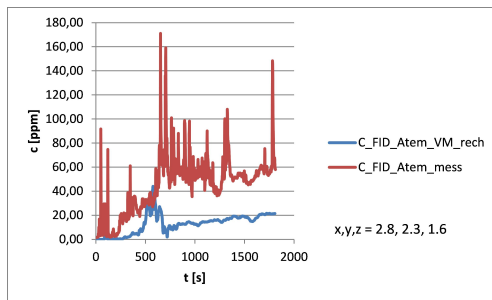


Relative Abweichung $L_2 = 0,52236$
 Inneres Produkt $cos = 0,91276$
 Projektionskoeffizient $a = 0,73710$

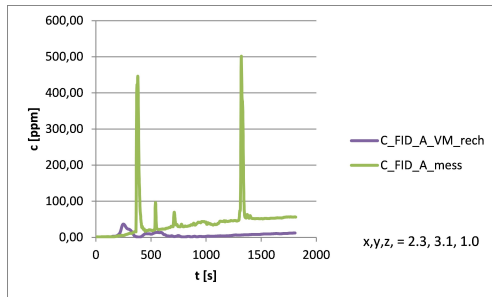


Relative Abweichung $L_2 = 0,72888$
 Inneres Produkt $cos = 0,94116$
 Projektionskoeffizient $a = 3,18641$

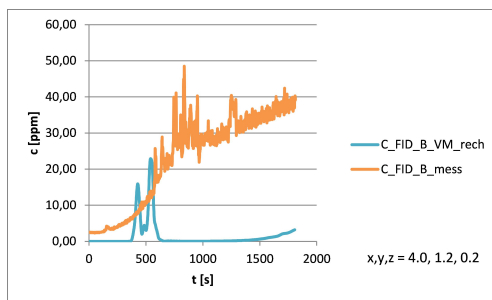
Versuch 2010-2



Relative Abweichung $L_2 = 0,74854$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88401$
 Projektionskoeffizient $a = 2,95278$

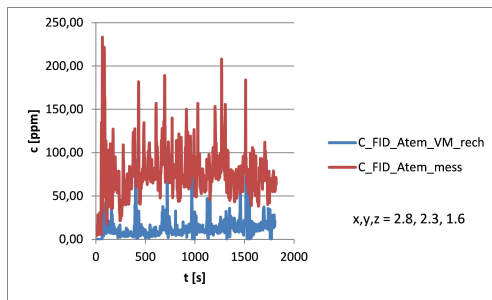


Relative Abweichung $L_2 = 0,95801$
 Inneres Produkt $\cos = 0,38983$
 Projektionskoeffizient $a = 3,10046$

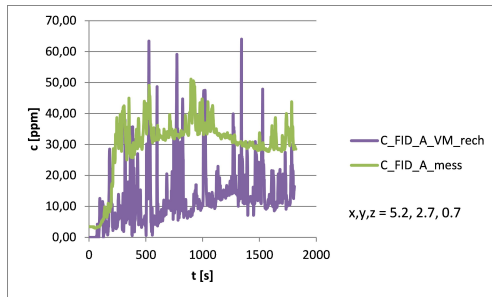


Relative Abweichung $L_2 = 0,97461$
 Inneres Produkt $\cos = 0,24210$
 Projektionskoeffizient $a = 1,61390$

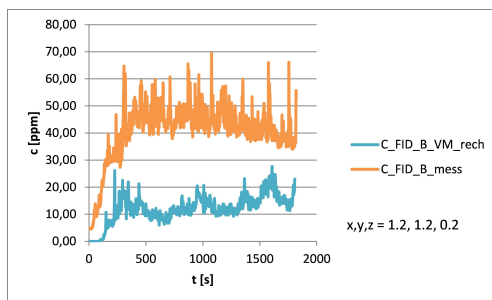
Versuch 2009-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,85417$
 Inneres Produkt $\cos = 0,75425$
 Projektionskoeffizient $a = 3,62810$

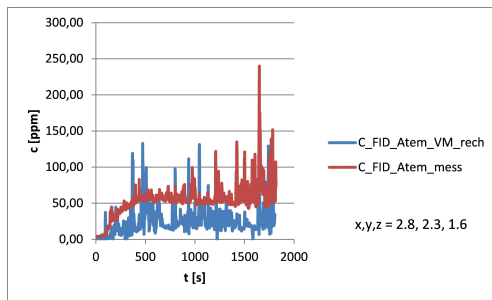


Relative Abweichung $L_2 = 0,64765$
 Inneres Produkt $\cos = 0,83419$
 Projektionskoeffizient $a = 1,68655$

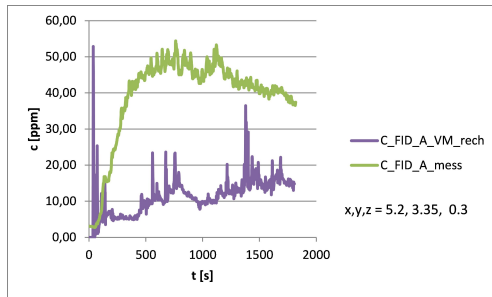


Relative Abweichung $L_2 = 0,71130$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94367$
 Projektionskoeffizient $a = 3,00516$

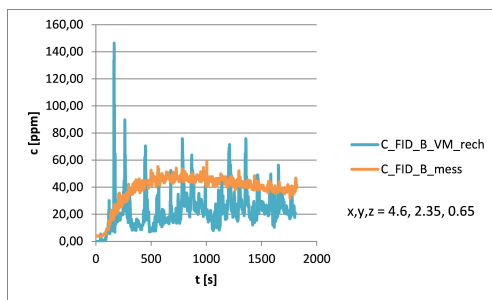
Versuch 2017-4



Relative Abweichung $L_2 = 0,65627$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80372$
 Projektionskoeffizient $a = 1,52547$



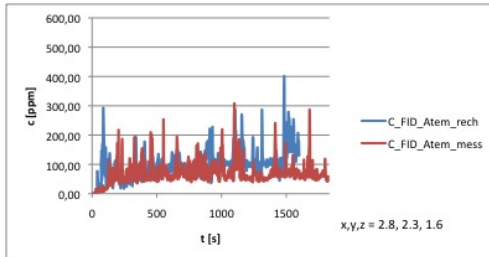
Relative Abweichung $L_2 = 0,73239$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92621$
 Projektionskoeffizient $a = 3,10480$



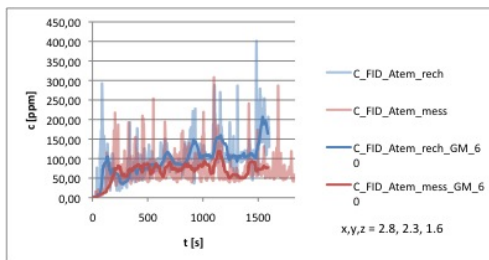
Relative Abweichung $L_2 = 0,53449$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87496$
 Projektionskoeffizient $a = 1,34899$

H.1.3 Sensitivitätsuntersuchung: Variation Lüftungsbedingungen

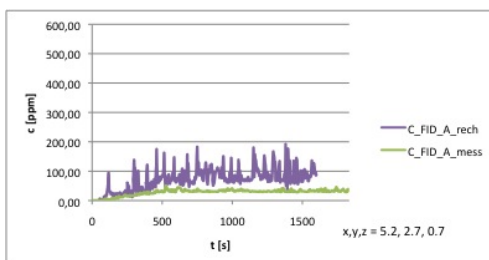
Versuch 2006-5



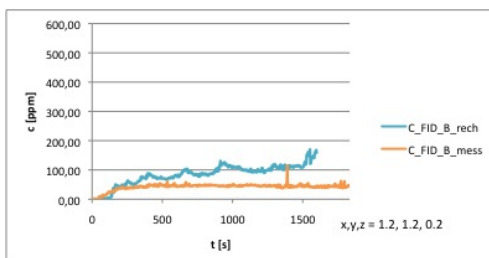
Relative Abweichung $L_2 = 0,84684$
 Inneres Produkt $\cos = 0,78224$
 Projektionskoeffizient $a = 0,57693$



Relative Abweichung $L_2 = 0,58713$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91048$
 Projektionskoeffizient $a = 0,68600$

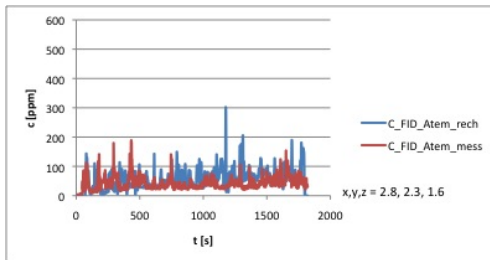


Relative Abweichung $L_2 = 1,07856$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89377$
 Projektionskoeffizient $a = 0,47677$

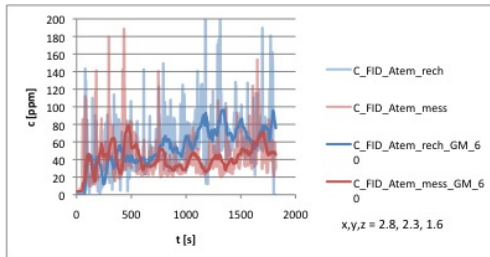


Relative Abweichung $L_2 = 0,65068$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97210$
 Projektionskoeffizient $a = 0,61563$

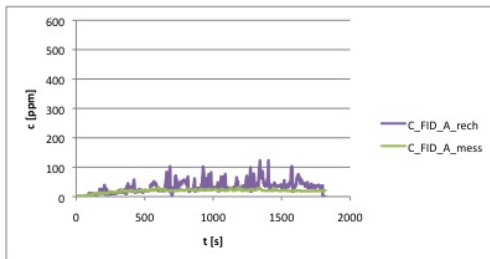
Versuch 2007-5



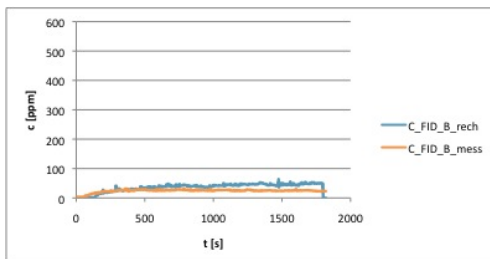
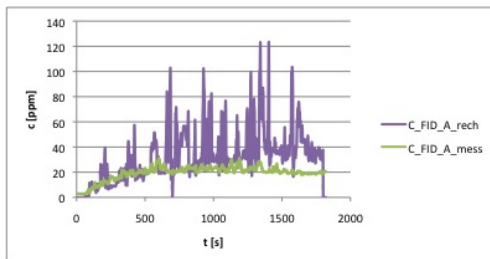
Relative Abweichung $L_2 = 0,84684$
 Inneres Produkt $cos = 0,78224$
 Projektionskoeffizient $a = 0,57693$



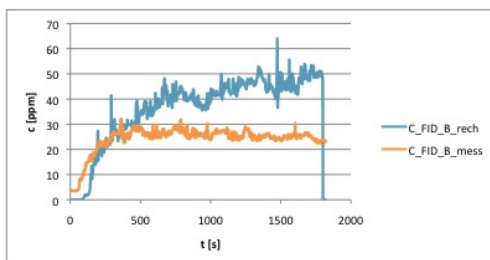
Relative Abweichung $L_2 = 0,58713$
 Inneres Produkt $cos = 0,91048$
 Projektionskoeffizient $a = 0,68600$



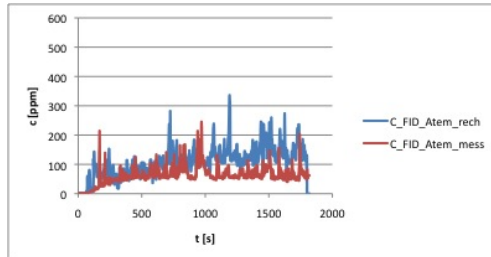
Relative Abweichung $L_2 = 1,07856$
 Inneres Produkt $cos = 0,89377$
 Projektionskoeffizient $a = 0,47677$



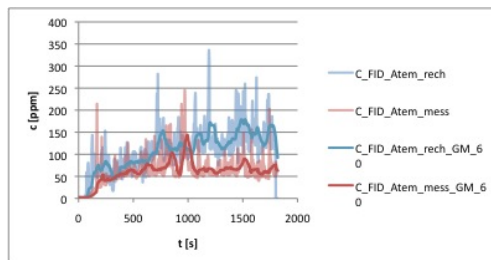
Relative Abweichung $L_2 = 0,65068$
 Inneres Produkt $cos = 0,97210$
 Projektionskoeffizient $a = 0,61563$



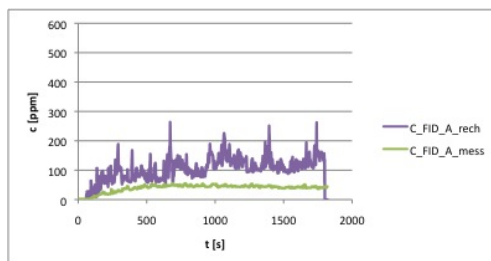
Versuch 2008-5



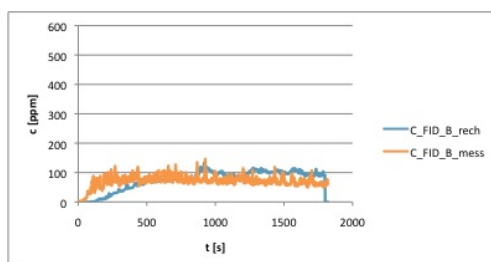
Relative Abweichung $L_2 = 0,97496$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88117$
 Projektionskoeffizient $a = 0,50822$



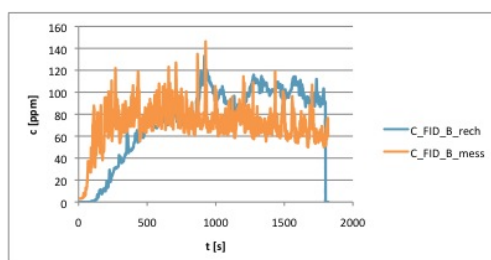
Relative Abweichung $L_2 = 0,86316$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95110$
 Projektionskoeffizient $a = 0,54129$



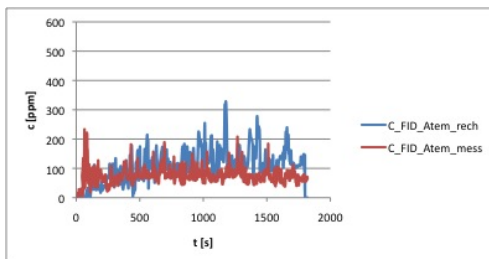
Relative Abweichung $L_2 = 1,75664$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95835$
 Projektionskoeffizient $a = 0,35605$



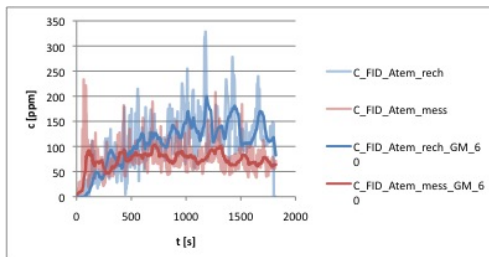
Relative Abweichung $L_2 = 0,43758$
 Inneres Produkt $\cos = 0,92151$
 Projektionskoeffizient $a = 0,82046$



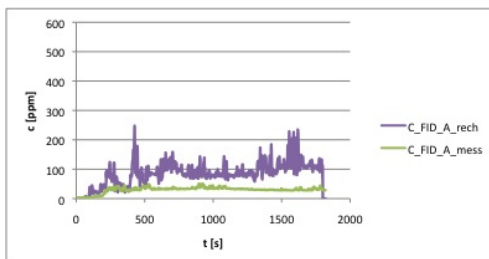
Versuch 2009-5



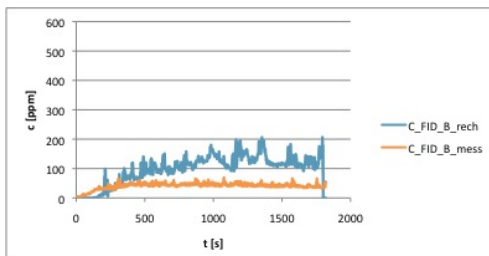
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,85115
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,86334
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,55744



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,70559
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,93428
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,60543

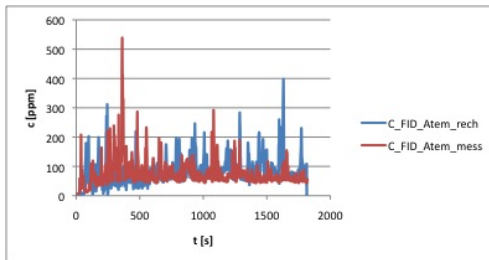


Relative Abweichung $L_2 =$ 2,09194
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,93211
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,31149

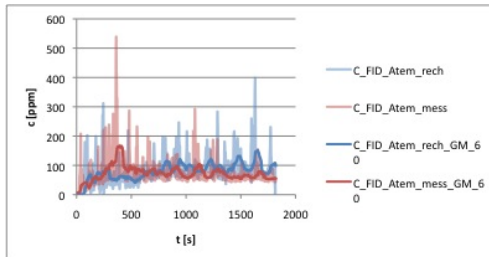


Relative Abweichung $L_2 =$ 1,73458
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,94211
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,35632

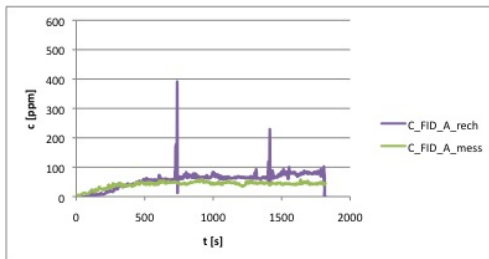
Versuch 2011-5



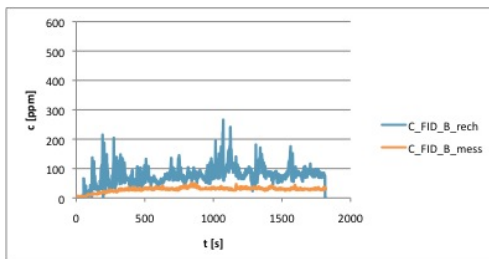
Relative Abweichung $L_2 = 0,75950$
 Inneres Produkt $\cos = 0,73809$
 Projektionskoeffizient $a = 0,67912$



Relative Abweichung $L_2 = 0,48459$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89654$
 Projektionskoeffizient $a = 0,82023$

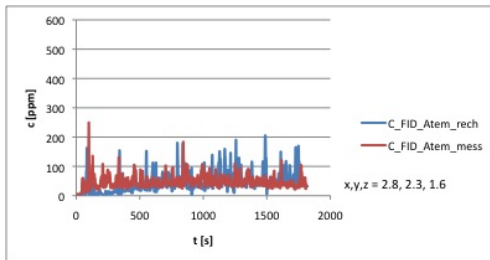


Relative Abweichung $L_2 = 0,65261$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94159$
 Projektionskoeffizient $a = 0,62748$

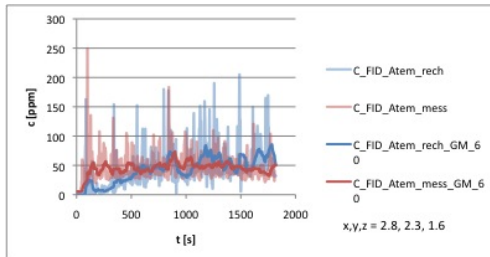


Relative Abweichung $L_2 = 1,87673$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93425$
 Projektionskoeffizient $a = 0,33645$

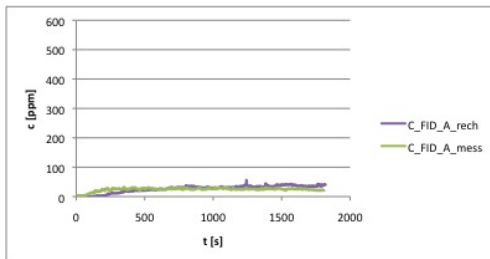
Versuch 2012-5



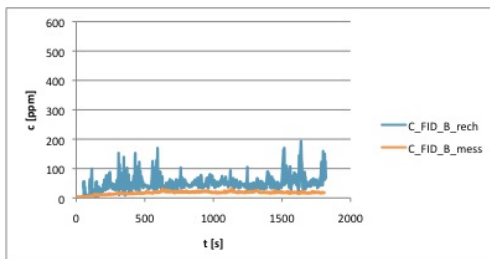
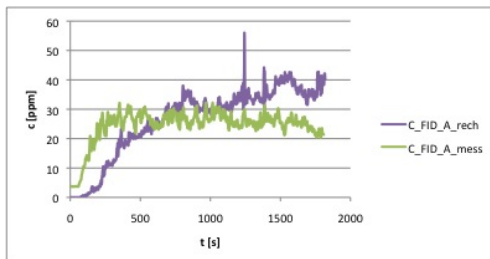
Relative Abweichung $L_2 = 0,72495$
 Inneres Produkt $cos = 0,76048$
 Projektionskoeffizient $a = 0,70235$



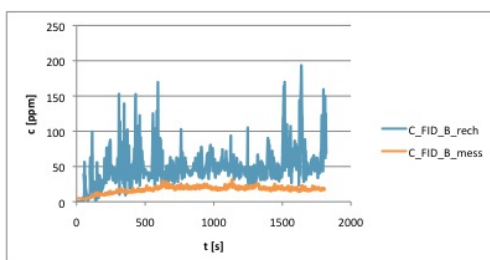
Relative Abweichung $L_2 = 0,43567$
 Inneres Produkt $cos = 0,90930$
 Projektionskoeffizient $a = 0,87575$



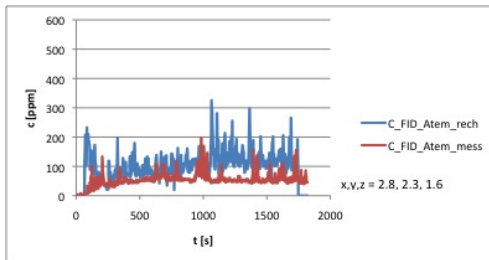
Relative Abweichung $L_2 = 0,38823$
 Inneres Produkt $cos = 0,94381$
 Projektionskoeffizient $a = 0,82248$



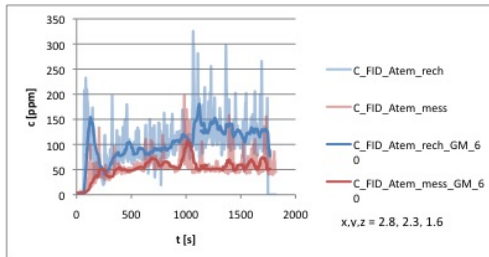
Relative Abweichung $L_2 = 2,16220$
 Inneres Produkt $cos = 0,90616$
 Projektionskoeffizient $a = 0,29940$



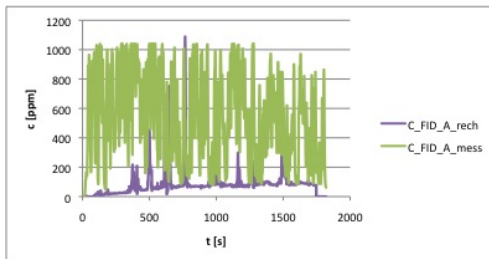
Versuch 2013-5



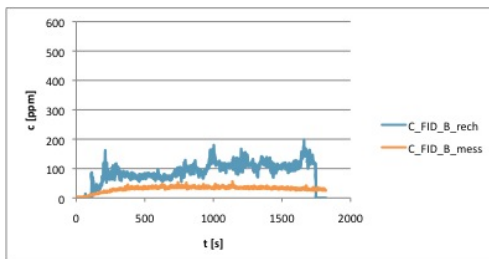
Relative Abweichung $L_2 = 1,17787$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87494$
 Projektionskoeffizient $a = 0,44899$



Relative Abweichung $L_2 = 1,03753$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94413$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48971$

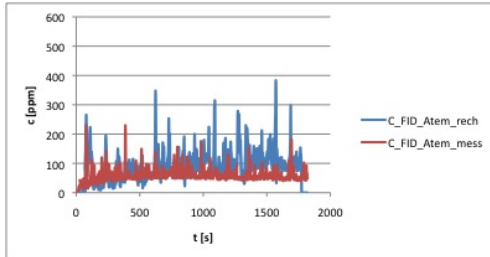


Relative Abweichung $L_2 = 0,90310$
 Inneres Produkt $\cos = 0,56703$
 Projektionskoeffizient $a = 2,88196$

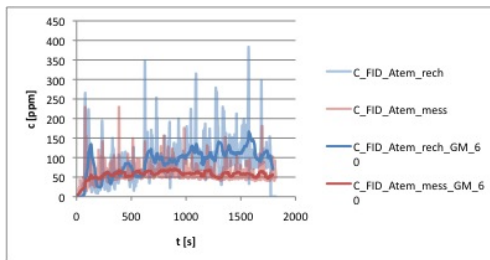


Relative Abweichung $L_2 = 2,09277$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95882$
 Projektionskoeffizient $a = 0,31621$

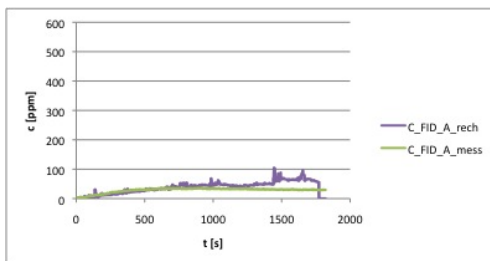
Versuch 2015-5



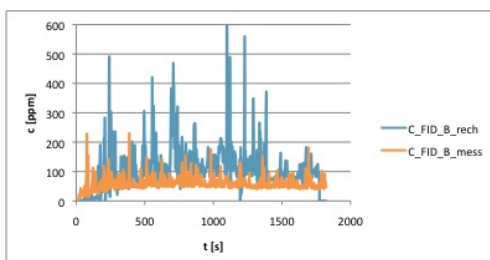
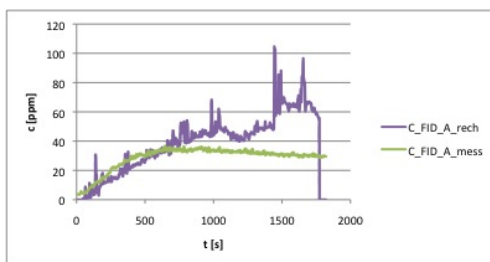
Relative Abweichung $L_2 = 1,03823$
 Inneres Produkt $cos = 0,84865$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48716$



Relative Abweichung $L_2 = 0,78754$
 Inneres Produkt $cos = 0,95213$
 Projektionskoeffizient $a = 0,56745$

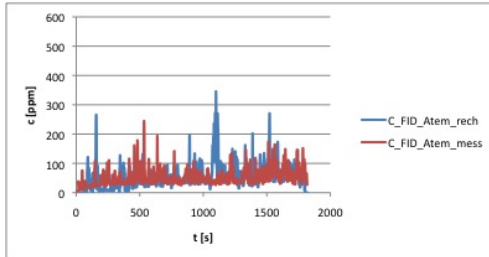


Relative Abweichung $L_2 = 0,62671$
 Inneres Produkt $cos = 0,94590$
 Projektionskoeffizient $a = 0,63822$

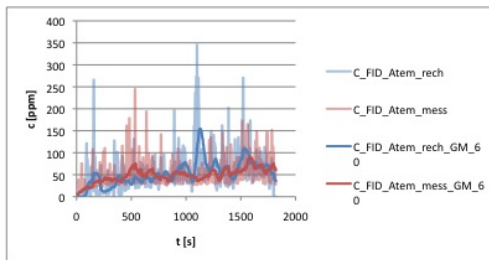


Relative Abweichung $L_2 = 3,89546$
 Inneres Produkt $cos = 0,87308$
 Projektionskoeffizient $a = 0,18428$

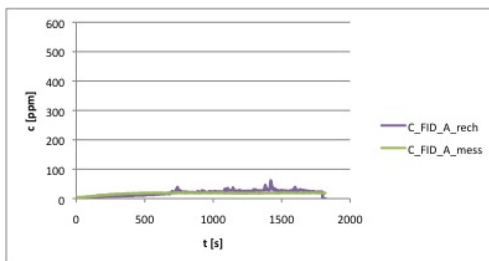
Versuch 2016-5



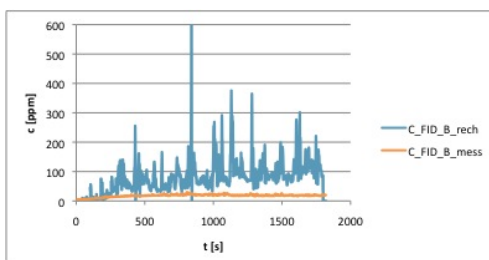
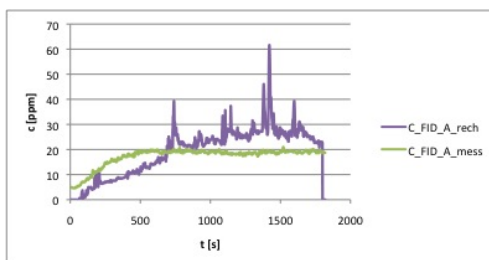
Relative Abweichung $L_2 = 0,80365$
 Inneres Produkt $\cos = 0,74846$
 Projektionskoeffizient $a = 0,62248$



Relative Abweichung $L_2 = 0,49800$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90721$
 Projektionskoeffizient $a = 0,77293$

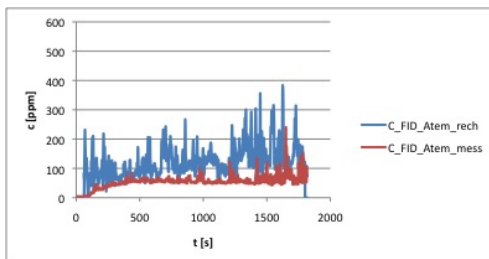


Relative Abweichung $L_2 = 0,44584$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94191$
 Projektionskoeffizient $a = 0,76261$

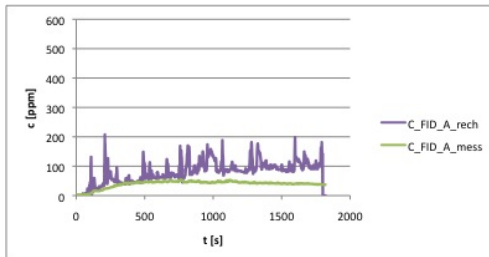


Relative Abweichung $L_2 = 4,47387$
 Inneres Produkt $\cos = 0,85476$
 Projektionskoeffizient $a = 0,16132$

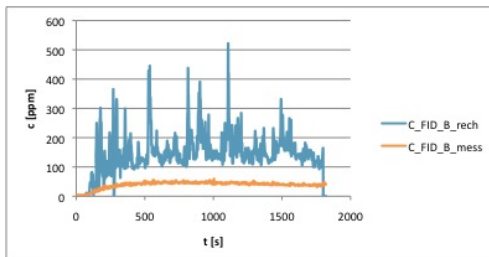
Versuch 2017-5



Relative Abweichung $L_2 = 1,43699$
Inneres Produkt $\cos = 0,88107$
Projektionskoeffizient $a = 0,39369$

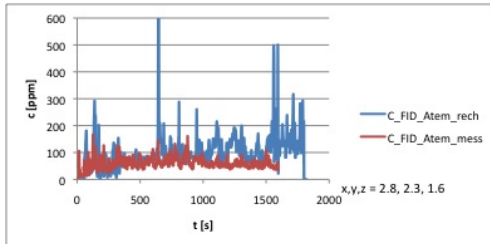


Relative Abweichung $L_2 = 1,26120$
Inneres Produkt $\cos = 0,94010$
Projektionskoeffizient $a = 0,43637$

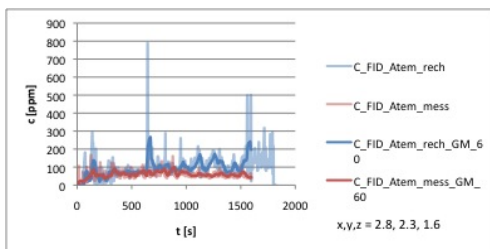


Relative Abweichung $L_2 = 2,97473$
Inneres Produkt $\cos = 0,94250$
Projektionskoeffizient $a = 0,24177$

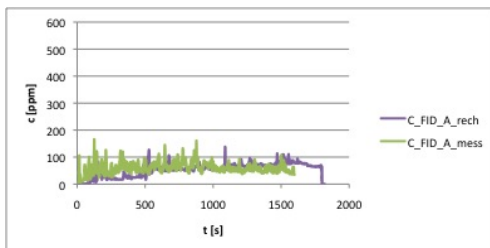
Versuch 2018-5



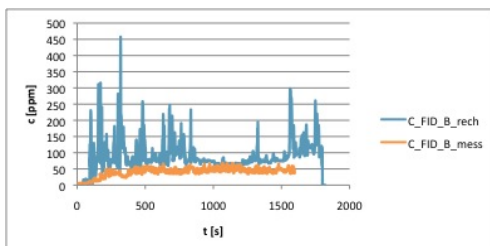
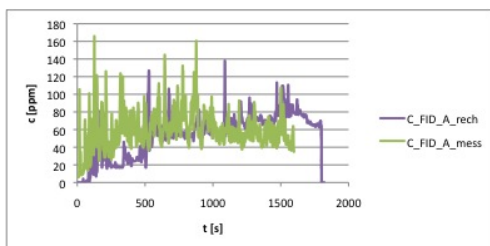
Relative Abweichung $L_2 = 1,15731$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82000$
 Projektionskoeffizient $a = 0,44910$



Relative Abweichung $L_2 = 0,88644$
 Inneres Produkt $\cos = 0,90663$
 Projektionskoeffizient $a = 0,53767$



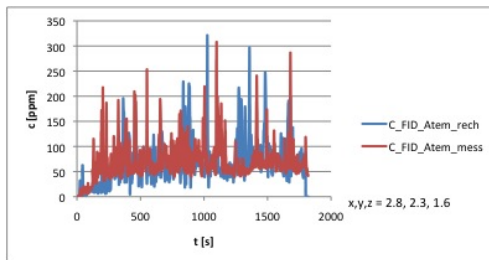
Relative Abweichung $L_2 = 1,04789$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95714$
 Projektionskoeffizient $a = 0,48729$



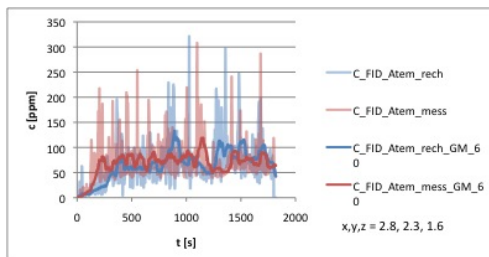
Relative Abweichung $L_2 = 1,47107$
 Inneres Produkt $\cos = 0,86228$
 Projektionskoeffizient $a = 0,38436$

H.1.4 Sensitivitätsuntersuchung: Abstimmung Raum- und Zulufttemperaturen

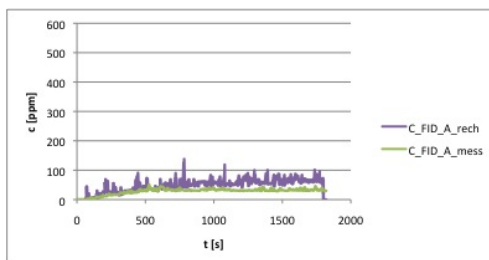
Versuch 2006-6



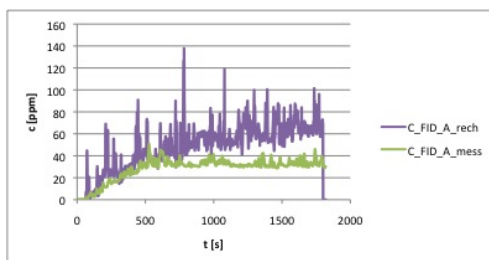
Relative Abweichung $L_2 = 0,64032$
 Inneres Produkt $\cos = 0,79563$
 Projektionskoeffizient $a = 0,79320$

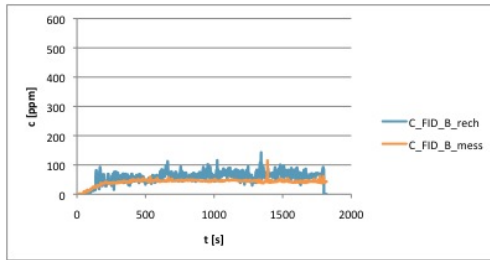


Relative Abweichung $L_2 = 0,35490$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93676$
 Projektionskoeffizient $a = 0,94084$

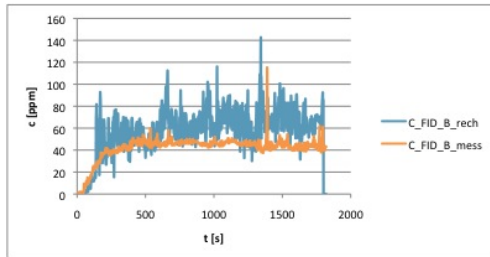


Relative Abweichung $L_2 = 0,84833$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96013$
 Projektionskoeffizient $a = 0,54519$

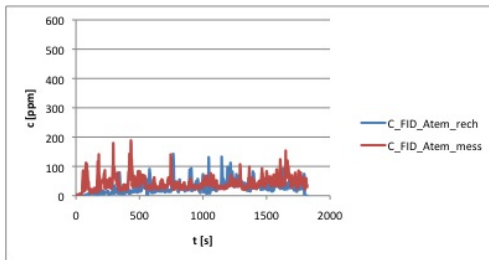




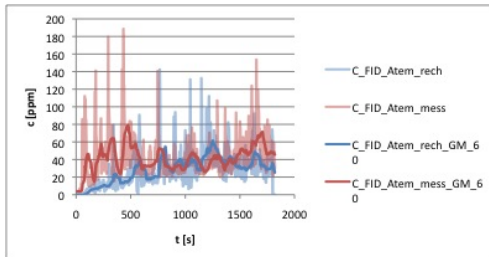
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,51661
Inneres Produkt $\cos =$ 0,96957
Projektionskoeffizient $a =$ 0,68065



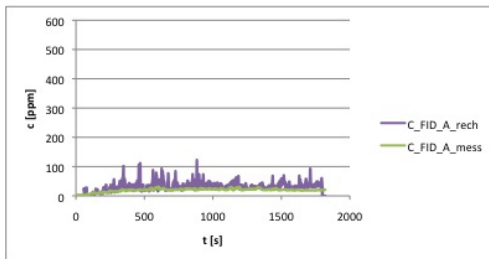
Versuch 2007-6



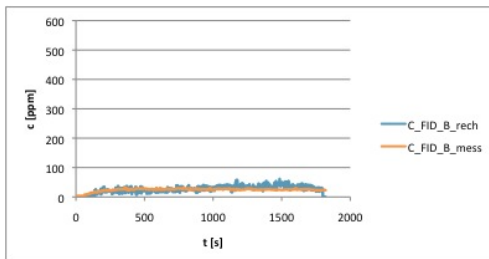
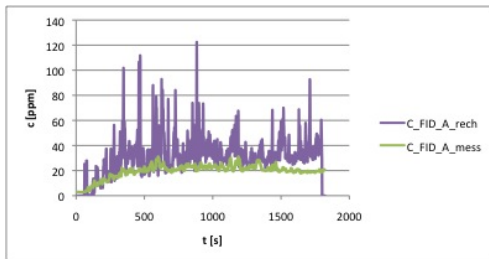
Relative Abweichung $L_2 = 0,69040$
 Inneres Produkt $cos = 0,72358$
 Projektionskoeffizient $a = 0,97965$



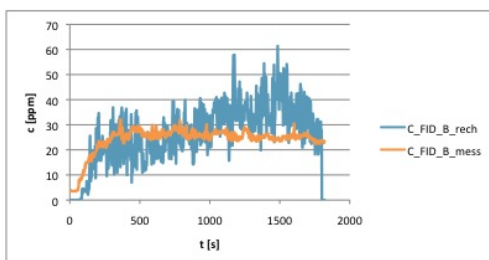
Relative Abweichung $L_2 = 0,51348$
 Inneres Produkt $cos = 0,86963$
 Projektionskoeffizient $a = 1,19366$

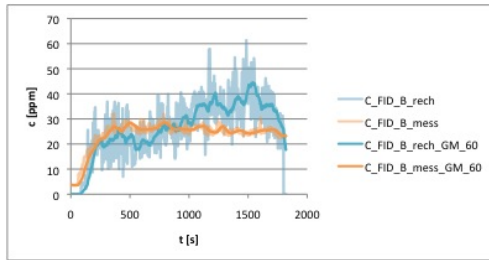


Relative Abweichung $L_2 = 0,86410$
 Inneres Produkt $cos = 0,93220$
 Projektionskoeffizient $a = 0,54297$



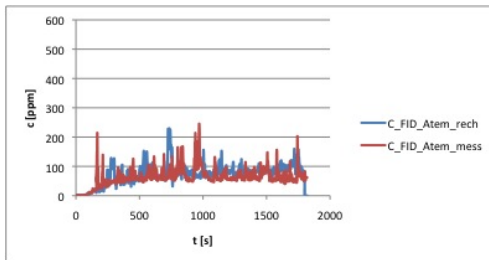
Relative Abweichung $L_2 = 0,39545$
 Inneres Produkt $cos = 0,94949$
 Projektionskoeffizient $a = 0,79780$



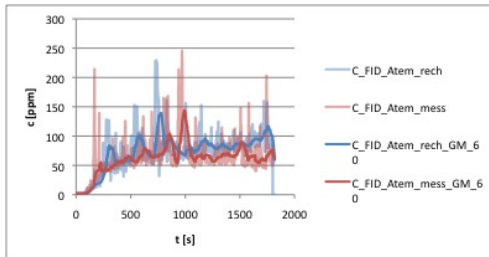


Relative Abweichung $L_2 = 0,32713$
Inneres Produkt $\cos = 0,96661$
Projektionskoeffizient $a = 0,82619$

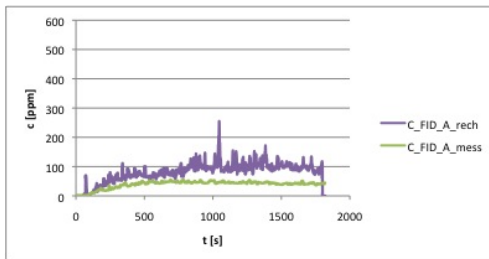
Versuch 2008-6



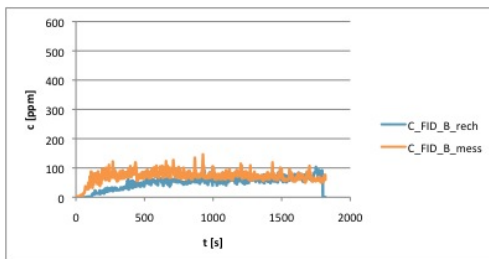
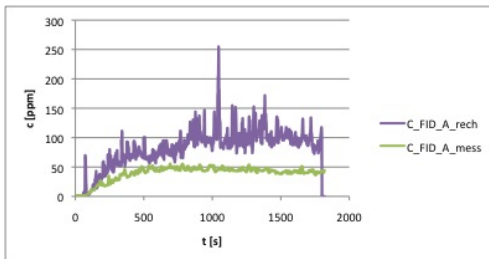
Relative Abweichung $L_2 = 0,53082$
 Inneres Produkt $cos = 0,89137$
 Projektionskoeffizient $a = 0,76341$



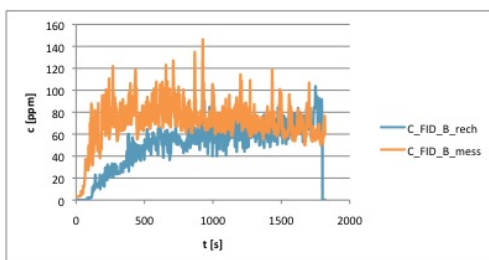
Relative Abweichung $L_2 = 0,37937$
 Inneres Produkt $cos = 0,95370$
 Projektionskoeffizient $a = 0,80486$



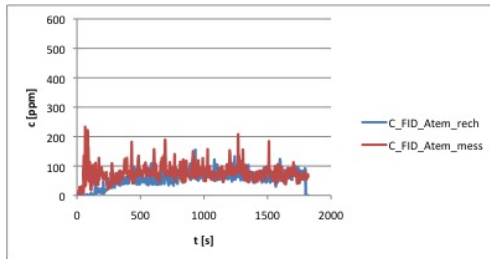
Relative Abweichung $L_2 = 1,21371$
 Inneres Produkt $cos = 0,97002$
 Projektionskoeffizient $a = 0,44926$



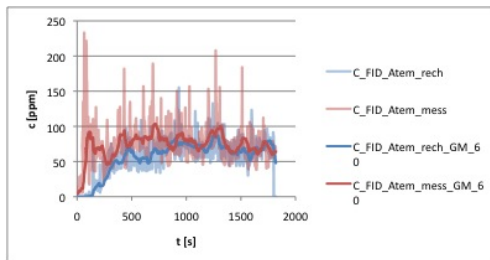
Relative Abweichung $L_2 = 0,39710$
 Inneres Produkt $cos = 0,93327$
 Projektionskoeffizient $a = 1,21840$



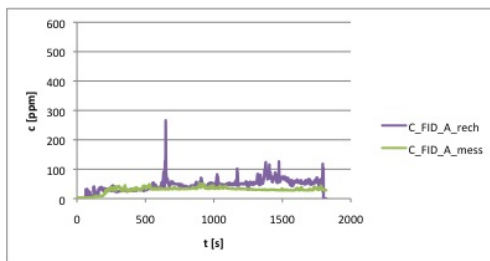
Versuch 2009-6



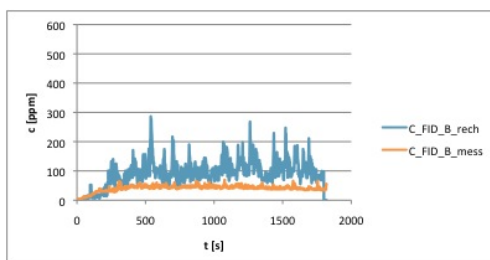
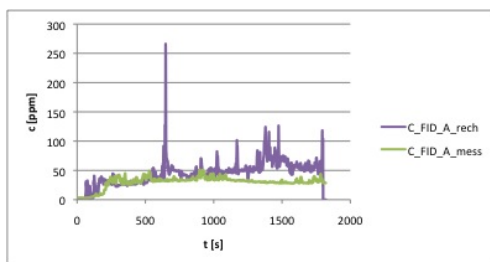
Relative Abweichung $L_2 = 0,46975$
 Inneres Produkt $\cos = 1,11471$
 Projektionskoeffizient $a = 1,19853$



Relative Abweichung $L_2 = 0,34829$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94745$
 Projektionskoeffizient $a = 1,17009$

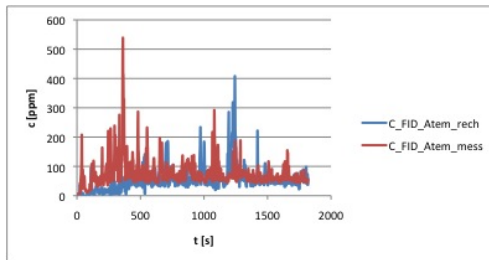


Relative Abweichung $L_2 = 0,77146$
 Inneres Produkt $\cos = 0,91511$
 Projektionskoeffizient $a = 0,58183$

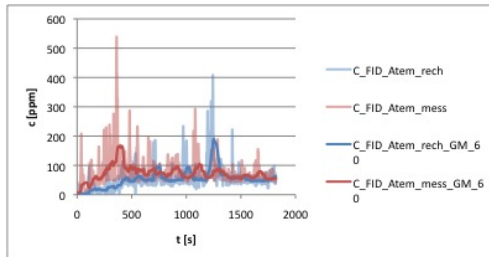


Relative Abweichung $L_2 = 1,57795$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93097$
 Projektionskoeffizient $a = 0,37751$

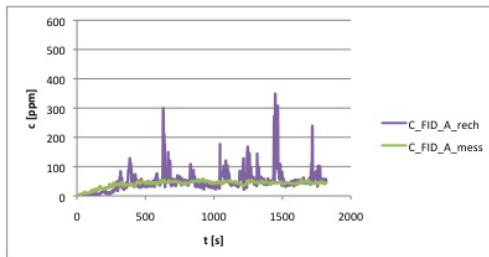
Versuch 2011-6



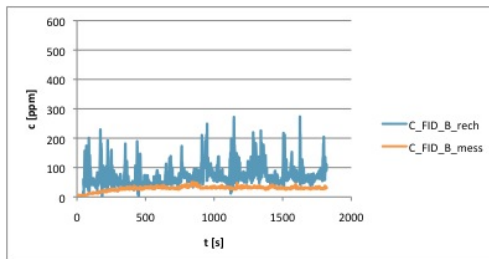
Relative Abweichung $L_2 = 0,71142$
 Inneres Produkt $\cos = 0,70745$
 Projektionskoeffizient $a = 0,89695$



Relative Abweichung $L_2 = 0,54913$
 Inneres Produkt $\cos = 0,83674$
 Projektionskoeffizient $a = 1,05141$

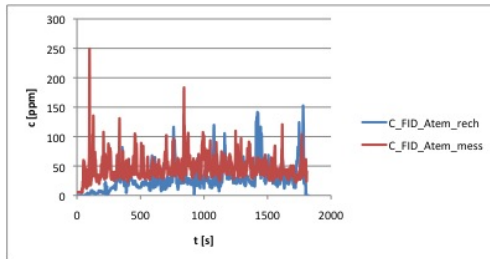


Relative Abweichung $L_2 = 0,87865$
 Inneres Produkt $\cos = 0,82498$
 Projektionskoeffizient $a = 0,55081$

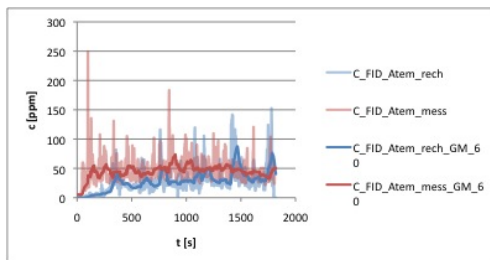


Relative Abweichung $L_2 = 1,79940$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88534$
 Projektionskoeffizient $a = 0,33745$

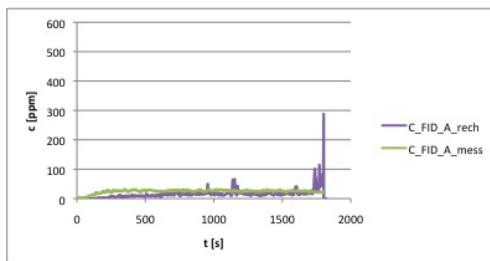
Versuch 2012-6



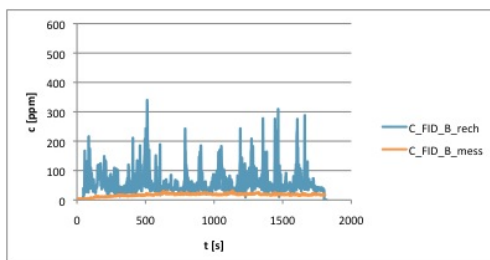
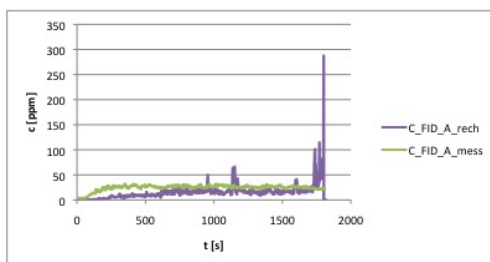
Relative Abweichung $L_2 = 0,67005$
 Inneres Produkt $\cos = 0,74231$
 Projektionskoeffizient $a = 1,00265$



Relative Abweichung $L_2 = 0,51020$
 Inneres Produkt $\cos = 0,87694$
 Projektionskoeffizient $a = 1,24263$

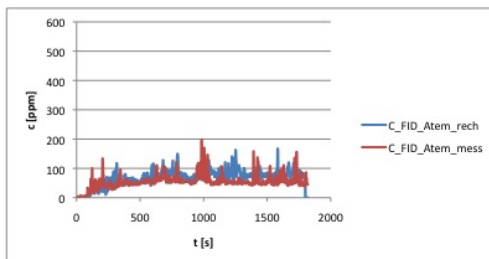


Relative Abweichung $L_2 = 0,61388$
 Inneres Produkt $\cos = 0,78940$
 Projektionskoeffizient $a = 1,00118$

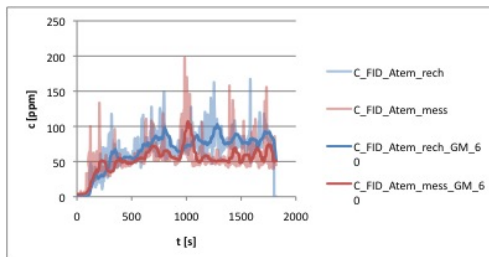


Relative Abweichung $L_2 = 3,21744$
 Inneres Produkt $\cos = 0,80095$
 Projektionskoeffizient $a = 0,20215$

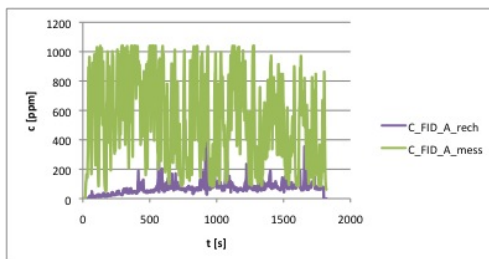
Versuch 2013-6



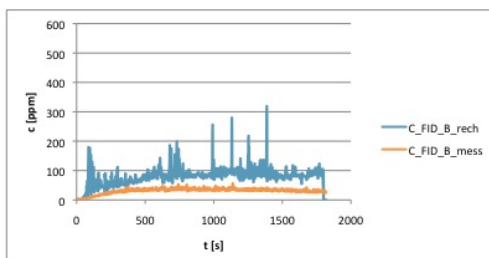
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,49292
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,92475
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,74697



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,37055
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,97130
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,77369

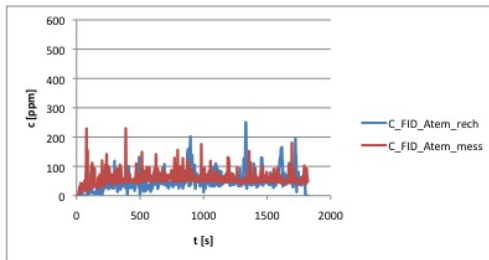


Relative Abweichung $L_2 =$ 0,90440
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,72946
 Projektionskoeffizient $a =$ 5,29349

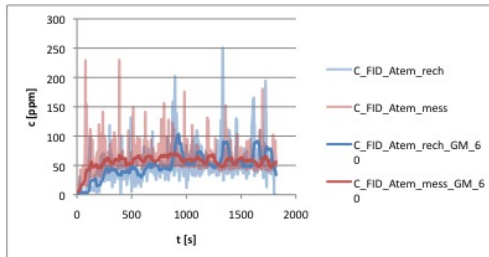


Relative Abweichung $L_2 =$ 1,71109
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,95624
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,36192

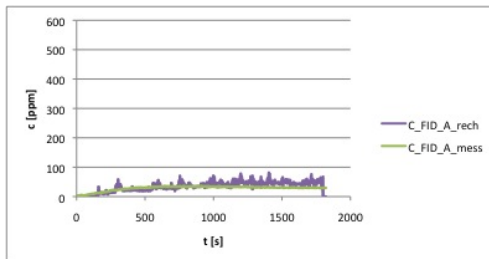
Versuch 2015-6



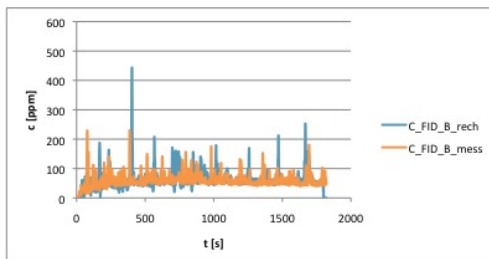
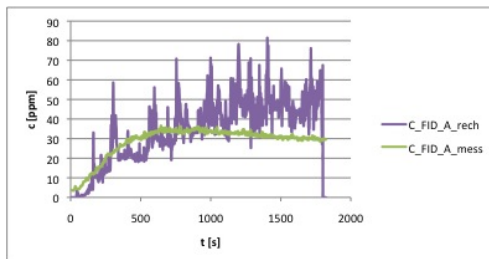
Relative Abweichung $L_2 = 0,59576$
 Inneres Produkt $\cos = 0,81907$
 Projektionskoeffizient $a = 0,83603$



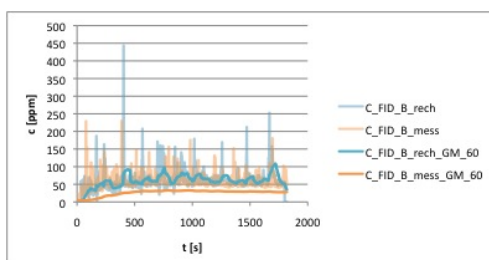
Relative Abweichung $L_2 = 0,33380$
 Inneres Produkt $\cos = 0,94265$
 Projektionskoeffizient $a = 0,99547$



Relative Abweichung $L_2 = 0,45183$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95421$
 Projektionskoeffizient $a = 0,73807$

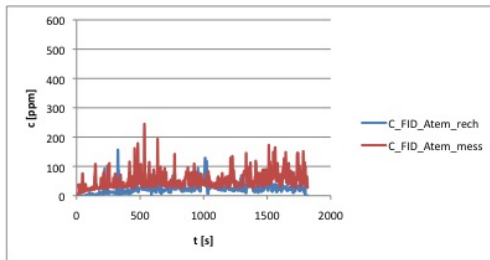


Relative Abweichung $L_2 = 1,65184$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89935$
 Projektionskoeffizient $a = 0,36086$

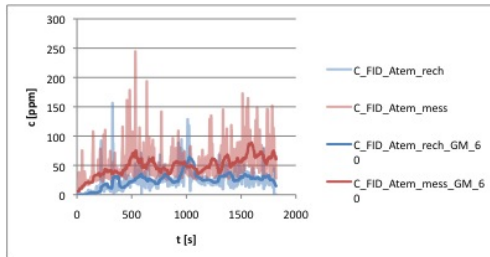


Relative Abweichung $L_2 = 1,34458$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97628$
 Projektionskoeffizient $a = 0,42386$

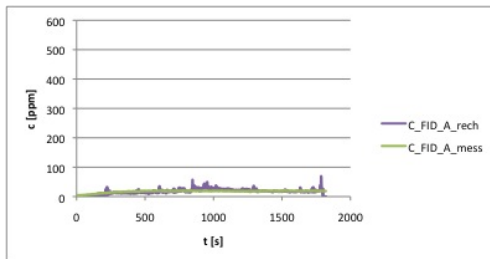
Versuch 2016-6



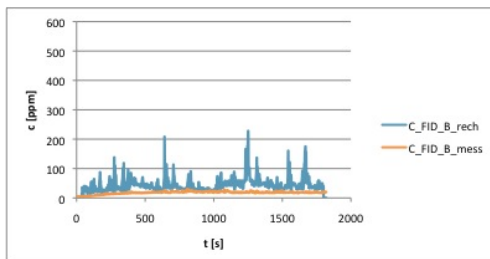
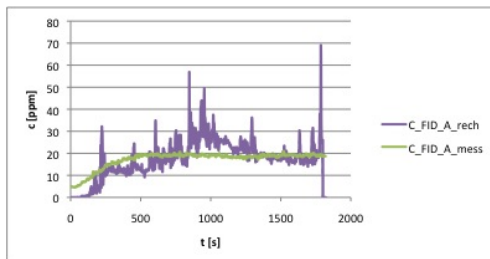
Relative Abweichung $L_2 = 0,67213$
 Inneres Produkt $cos = 0,77628$
 Projektionskoeffizient $a = 1,42929$



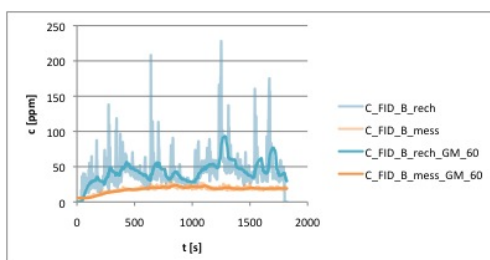
Relative Abweichung $L_2 = 0,53901$
 Inneres Produkt $cos = 0,92531$
 Projektionskoeffizient $a = 1,70644$



Relative Abweichung $L_2 = 0,35414$
 Inneres Produkt $cos = 0,94905$
 Projektionskoeffizient $a = 0,85450$

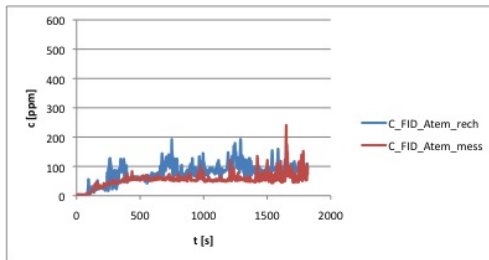


Relative Abweichung $L_2 = 1,86992$
 Inneres Produkt $cos = 0,88394$
 Projektionskoeffizient $a = 0,32806$

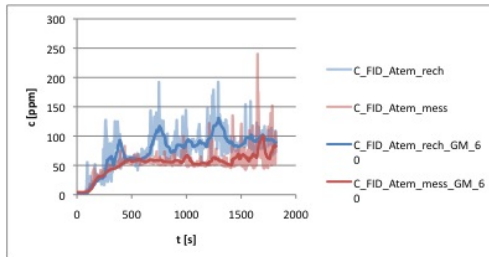


Relative Abweichung $L_2 = 1,57810$
 Inneres Produkt $cos = 0,95446$
 Projektionskoeffizient $a = 0,38116$

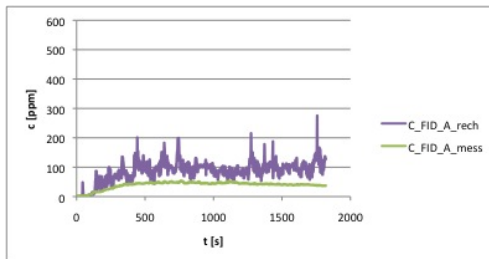
Versuch 2017-6



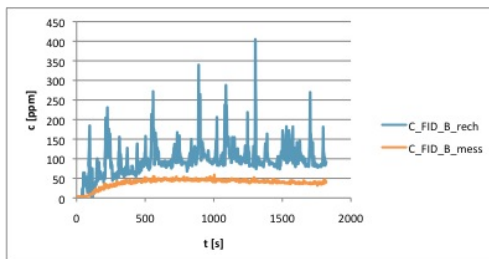
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,60528
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,93634
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,65507



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,51569
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,97871
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,67414

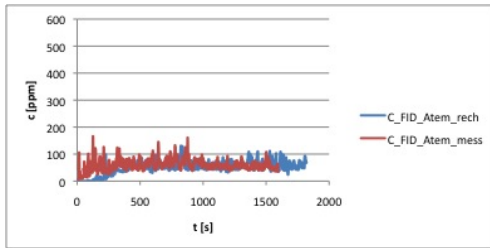


Relative Abweichung $L_2 =$ 1,32391
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,96583
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,42658

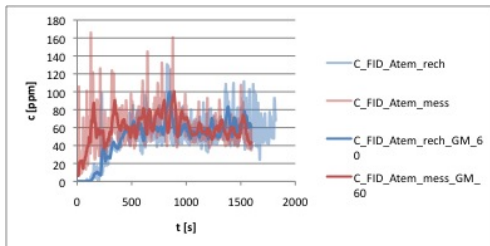


Relative Abweichung $L_2 =$ 1,67899
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,93696
 Projektionskoeffizient $a =$ 0,36328

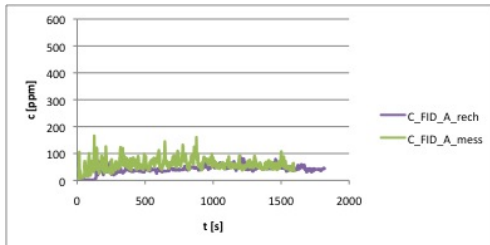
Versuch 2018-6



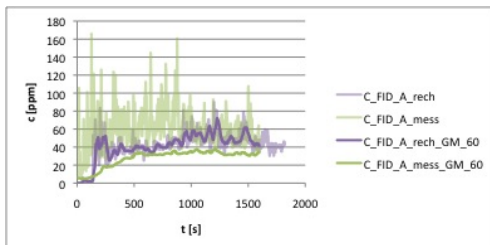
Relative Abweichung $L_2 = 0,47178$
 Inneres Produkt $\cos = 0,88172$
 Projektionskoeffizient $a = 1,00120$



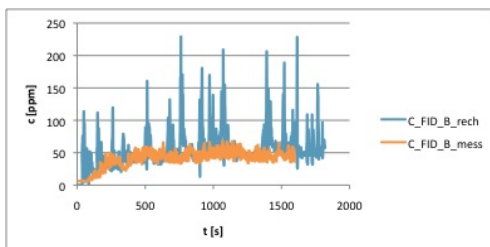
Relative Abweichung $L_2 = 0,36692$
 Inneres Produkt $\cos = 0,93143$
 Projektionskoeffizient $a = 1,05287$



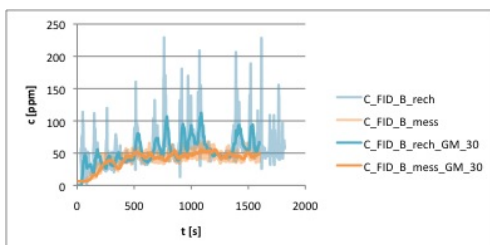
Relative Abweichung $L_2 = 0,58731$
 Inneres Produkt $\cos = 0,96858$
 Projektionskoeffizient $a = 0,64544$



Relative Abweichung $L_2 = 0,54980$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97918$
 Projektionskoeffizient $a = 0,65711$



Relative Abweichung $L_2 = 0,66176$
 Inneres Produkt $\cos = 0,89891$
 Projektionskoeffizient $a = 0,64445$



Relative Abweichung $L_2 = 0,49453$
 Inneres Produkt $\cos = 0,95018$
 Projektionskoeffizient $a = 0,71222$

H.1.5 Zusammenfassung statistischer Kennwerte

H.1.5.1 Vergleiche zu Propan-Versuchen (Untersuchungsschritt 1)

Versuchsnummer	FID_Atem			Pos. 1				Pos. 2			
	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.
1004-2 (-1 ohne NR)	0,97930	0,84293	34,17906	1	0,89063	0,86602	6,71405	2	0,88538	0,96117	8,01661
1004-3	0,97176	0,79071	21,94539	1	0,83403	0,77234	3,33102	2	0,88029	0,88889	6,47896
1004-4	0,97133	0,78158	21,10386	1	0,84071	0,75374	3,28552	2	0,85946	0,94500	6,29140
1004-5	0,94826	0,79115	11,89567	1	0,71596	0,75979	1,65174	2	0,83050	0,96558	5,45942
1005-2 (-1 ohne NR)	0,94037	0,92073	14,13586	3	0,87287	0,92854	6,70208	4	0,90285	0,96639	9,57605
1005-3	0,92890	0,83311	9,59368	3	0,75819	0,92531	3,44272	4	0,96513	0,96219	26,51584
1006-2 (-1 ohne NR)	0,97953	0,86130	36,11319	5	0,95482	0,93699	19,36820	-	Ausfall FID		
1006-3	0,96624	0,85250	21,38318	5	0,95632	0,91023	18,87806	-			
1007-2 (-1 ohne NR)	0,96509	0,86373	21,23994	3	0,88706	0,93158	7,60862	-			
1007-3	0,95778	0,86260	17,48785	3	0,84448	0,96214	5,90791	-			
1007-4	0,93481	0,84268	10,73640	3	0,80705	0,95773	4,69751	-			
1007-5	0,94202	0,83794	11,94925	3	0,79889	0,95286	4,45624	-			
1008-2 (-1 ohne NR)	0,94997	0,94140	17,67196	7	0,91846	0,90122	9,85780	-			
1008-3	0,94125	0,88728	13,28717	7	0,95550	0,90667	18,37850	-			
1010-1	0,93595	0,81957	10,94072	5	0,97285	0,47425	7,86362	-			
1010-2	0,89827	0,80619	6,18717	5	0,97529	0,53709	11,29854	-			
1011-1	0,94175	0,90721	14,03501	3	0,91742	0,96385	11,21081	-			
1011-2	0,90702	0,84518	7,52152	3	0,92619	0,96768	12,65176	-			
1012-1	0,94228	0,92071	14,60473	7	0,88644	0,96527	8,16611	-			
1012-2	0,89854	0,89415	7,76655	7	0,82722	0,98276	5,56919	-			
1013-1	0,90882	0,96292	10,12904	8	0,96475	0,87430	21,56391	-			
1013-2	0,85656	0,94255	6,12750	8	0,94203	0,86533	12,78296	-			
1014-1	0,92735	0,88157	10,57568	1	0,84633	0,94899	5,80120	-			
1014-2	0,88718	0,86699	6,51917	1	0,82605	0,90259	4,56819	-			
1015-1	0,93524	0,90239	12,47261	2	0,88499	0,97738	8,28040	-			
1015-2	0,87499	0,84196	5,49899	2	0,77393	0,95169	3,94425	-			
1016-1	0,91977	0,89848	9,95644	5	0,97466	0,44259	7,29106	-			
1016-2	0,90639	0,87263	8,00027	5	0,98235	0,40574	8,87865	-			
1017-1	0,90801	0,88751	8,44427	3	0,89923	0,97457	9,39752	-			
1017-2	0,91081	0,88214	8,60151	3	0,89023	0,96814	8,50375	-			
1018-1	0,94663	0,82634	12,62456	7	0,86652	0,98829	7,30402	-			
1018-2	0,95059	0,85583	14,68135	7	0,84221	0,98304	6,10425	-			
1019-1	0,95115	0,82642	13,81291	1	0,84856	0,97499	6,24096	2	0,90610	0,98639	10,34637
1019-2	0,95038	0,82088	13,40729	1	0,79521	0,98081	4,67346	2	0,87545	0,98319	7,74217
1020-1	0,96204	0,92882	22,65414	1	0,81193	0,95103	4,74953	2	0,94404	0,87009	13,39729
1020-2	0,94894	0,90212	15,83996	1	0,72463	0,97053	3,37997	2	0,91460	0,88127	8,96977
1021-1	0,93858	0,98427	15,75637	3	0,91658	0,98310	11,56707	5	0,93174	0,99260	14,42574
1021-2	0,92463	0,95832	12,14074	3	0,86873	0,97999	7,29289	5	0,92667	0,98765	13,28964
1022-1	0,97145	0,88221	27,14934	7	0,83760	0,97347	5,80364	8	0,95978	0,96578	23,15786
1022-2	0,96796	0,86753	23,16598	7	0,80502	0,97329	4,82534	8	0,95041	0,95357	18,28977
1023-1	0,96771	0,86493	23,03411	7	0,88736	0,92840	7,57366	8	0,95508	0,93603	19,43787
1023-2	0,95882	0,85028	17,41172	7	0,87077	0,88709	5,96432	8	0,94923	0,91996	16,58759

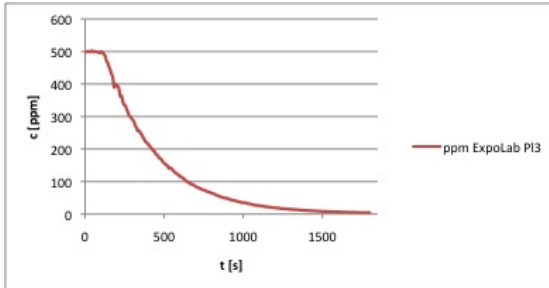
H.1.5.2 Vergleiche zu Isopropanol-Versuchen (Untersuchungsschritt 2, Sensitivitätsuntersuchungen)

Versuchsnummer	FID_Atem			Pos. 1				Pos. 2			
	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.
2001-1	0,87531	0,84268	0,54976	1	0,50103	0,90026	0,78404	2	0,55682	0,91821	1,74280
2001-2	0,80854	0,27670	3,36961	1	0,72426	0,88908	2,71217	2	0,93800	0,83481	11,07866
2002-1	0,68276	0,77665	1,51297	1	1,77776	0,70304	0,30143	2	1,44741	0,96093	0,40348
2002-2	1,28007	0,69081	0,39540	1	2,70373	0,69571	0,21068	2	0,54248	0,97684	0,66211
2002-3											
2002-4	0,80554	0,60319	0,84239	1	1,05417	0,61366	0,46768	2	0,71991	0,95839	3,22215
2003-1	0,80035	0,78013	2,77664	1	3,07528	0,27631	0,08641	2	1,78431	0,95036	0,35103
2003-2	0,90797	0,53269	0,61827	1	3,08681	0,31271	0,09623	2	0,71589	0,94019	0,59891
2003-3	0,92611	0,75463	7,46494	1	1,57406	0,21427	0,14792		0,29211	0,95834	0,94002
2003-4	0,91157	0,52842	0,61416	1	3,08483	0,31321	0,09643		0,71770	0,93747	0,59898
2004-1	0,72312	0,79912	2,01156	1	2,10174	0,76475	0,27655	2	1,96054	0,97769	0,33403
2004-2	0,63804	0,79620	0,79720	1	2,80864	0,78068	0,22185	2	1,41538	0,94383	0,40681
2004-3	0,91706	0,71618	5,90573	1	0,73140	0,69264	0,85108	2	0,34733	0,97784	1,39555
2004-4	0,76470	0,71859	1,79393	1	0,86117	0,71326	0,58772	2	0,50734	0,96315	1,80712
2005-1	0,89752	0,92738	0,53200	3	1,18593	0,73378	0,43016	4	0,36769	0,94182	0,86334
2005-2	0,79077	0,94227	4,17130	3	0,83230	0,72557	2,81872	4	0,99233	0,89948	105,41905
2006-1	0,65376	0,81705	1,60563	3	2,26755	0,92292	0,29229	4	0,22170	0,97517	0,98936
2006-2	0,75553	0,77195	0,65404	3	0,89609	0,86054	0,53859	4	0,51078	0,96898	0,68431
2006-3	0,68093	0,82980	1,88751	3	1,73562	0,93276	0,35459	4	0,23245	0,98057	1,14566
2006-4	0,82998	0,65152	2,06935	3	0,73761	0,84084	2,47486	4	0,76063	0,98307	4,01519
2006-5-SL	0,80161	0,93484	0,58894	3	1,80091	0,94038	0,34715	4	1,14561	0,96692	0,46402
2006-6-ST	0,64032	0,79563	0,79320	3	0,84833	0,96013	0,54519	4	0,51661	0,96957	0,68065
2007-1	0,68093	0,82980	1,88751	3	1,73562	0,93276	0,35459	4	0,23245	0,98057	1,14556
2007-2	0,89421	0,67385	0,57226	3	0,64181	0,83017	0,72306	4	0,22000	0,97567	0,98168
2007-3	0,89364	0,80692	5,91939	3	0,41114	0,91525	1,09841	4	0,79193	0,96892	4,47308
2007-4	0,87078	0,76344	4,25551	3	0,84074	0,69997	2,73052	4	0,81603	0,97652	5,15485
2007-5-SL	0,84684	0,78224	0,57693	3	1,07856	0,89377	0,47677	4	0,65068	0,97210	0,61563
2007-6-ST	0,69040	0,72358	0,97965	3	0,86410	0,93220	0,54297	4	0,39545	0,94949	0,79780
2008-1	0,49517	0,87524	1,13778	3	1,11645	0,95930	0,47037	4	0,51170	0,95231	1,75853
2008-2	0,69292	0,87087	0,64068	3	0,90076	0,93794	0,53013	4	0,43284	0,94159	1,40606
2008-3	0,86073	0,82946	4,75116	3	0,58986	0,95613	2,15274	4	0,89204	0,95893	8,47232
2008-4	0,70401	0,79169	1,79180	3	0,65185	0,90963	2,23332	4	0,84059	0,94331	5,51553
2008-5-SL	0,97496	0,88117	0,50822	3	1,75664	0,95835	0,35605	4	0,43758	0,92151	1,02106
2008-6-ST	0,53082	0,89137	0,76341	3	1,21371	0,97002	0,44926	4	0,39710	0,93327	1,21840
2009-1	0,59459	0,85745	1,53246	3	2,20348	0,93098	0,29993	4	0,31822	0,95100	0,92665
2009-2	0,53295	0,84908	1,09056	3	1,60110	0,93858	0,37512	4	0,77156	0,93023	0,57817
2009-3	0,84258	0,83445	4,23406	3	0,52236	0,91276	0,73710	4	0,72888	0,94116	3,18641
2009-4	0,85417	0,75425	3,62810	3	0,64765	0,83419	1,68655	4	0,71130	0,94367	3,00516
2009-5-SL	0,85115	0,86334	0,55744	3	2,09194	0,93211	0,31149	4	1,73458	0,94211	0,35632
2009-6-ST	0,46975	1,11471	1,19853	3	0,77146	0,91511	0,58183	4	1,57795	0,93097	0,37751

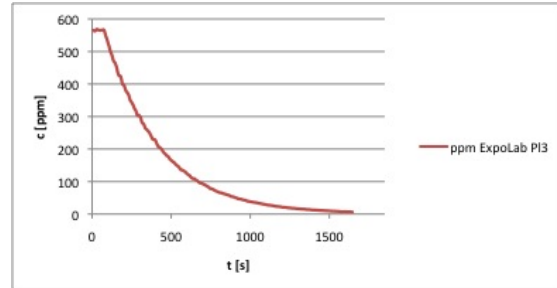
Versuchsnummer	FID_Atem			Pos. 1				Pos. 2			
	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.	FID	Normale	Inn. Prod.	Proj.-koeff.
2010-1	0,66763	0,89163	0,64504	5	0,89683	0,58310	0,60552	6	0,31059	0,97524	1,28803
2010-2	0,74854	0,88401	2,95278	5	0,95801	0,38983	3,10046	6	0,97461	0,24210	1,61390
2011-1	0,74175	0,78476	2,08005	5	0,46384	0,95903	1,62064	6	1,84319	0,92508	0,33902
2011-2	0,72994	0,70953	0,78847	5	0,25381	0,97135	1,10095	6	1,26120	0,90813	0,43289
2011-3	0,90536	0,77105	6,04883	5	0,81345	0,94252	4,69207	6	0,41271	0,91714	1,13228
2011-4	0,84806	0,65598	2,43577	5	0,81139	0,97922	5,05828	6	0,68105	0,92220	2,55038
2011-5-SL	0,75950	0,73809	0,67912	5	0,65261	0,94159	0,62748	6	1,87673	0,93425	0,33645
2011-6-ST	0,71142	0,70745	0,89695	5	0,87865	0,82498	0,55081	6	1,79940	0,88534	0,33745
2012-1	0,62445	0,82848	1,50022	5	0,55896	0,94569	1,92612	6	0,90432	0,88829	0,53277
2012-2	1,31230	0,72939	0,39442	5	0,93357	0,68685	0,53965	6	0,24415	0,97104	1,05458
2012-3	0,84182	0,85901	4,50304	5	0,81509	0,93824	4,68580	6	0,47448	0,94370	1,56361
2012-4	0,97509	0,65681	17,02031	5	0,98121	0,88385	41,45307	6	0,97638	0,97404	40,14358
2012-5-SL	0,72495	0,76048	0,70235	5	0,38823	0,94381	0,82248	6	2,16220	0,90616	0,29940
2012-6-ST	0,67005	0,74231	1,00265	5	0,61388	0,78940	1,00118	6	3,21744	0,80095	0,20215
2013-1	0,46886	0,88344	0,98104	5	0,93348	0,61093	5,25175	6	1,38042	0,96830	0,41361
2013-2	0,84939	0,88556	0,55463	5	0,93708	0,76798	9,14936	6	1,47227	0,95693	0,39868
2013-3	0,83501	0,77254	3,35501	5	0,98204	0,47910	12,37719	6	0,54863	0,94370	1,86403
2013-4	0,65025	0,76914	1,18492	5	0,98375	0,75285	34,64966	6	0,50515	0,97490	1,86951
2013-5-SL	1,17787	0,87494	0,44899	5	0,90310	0,56703	2,88196	6	2,09277	0,95882	0,31621
2013-6-ST	0,49292	0,92475	0,74697	5	0,90440	0,72946	5,29349	6	1,71109	0,95624	0,36192
2014-1	1,45712	0,88990	0,39137	7	1,03004	0,81975	0,48914	8	3,18978	0,81047	0,20539
2014-2	0,96562	0,97330	22,05959	7	0,99137	0,76913	68,32117	8	0,98206	0,86893	41,95662
2015-1	0,64584	0,78674	1,31822	7	1,06951	0,82761	0,47619	8	2,56257	0,90333	0,26338
2015-2	1,02234	0,76391	0,49068	7	0,32163	0,96550	1,24304	8	2,41236	0,80262	0,25561
2015-3	0,86895	0,57766	2,06512	7	0,61606	0,89119	1,87874	8	0,39457	0,92153	0,92935
2015-4	0,79359	0,61439	0,87818	7	0,85120	0,98446	6,49484	8	0,69285	0,81678	1,88566
2015-5-SL	1,03823	0,84865	0,48716	7	0,62671	0,94590	0,63822	8	3,89546	0,87308	0,18428
2015-6-ST	0,59576	0,81907	0,83603	7	0,45183	0,95421	0,73807	8	1,65184	0,89935	0,36086
2016-1	0,74343	0,75696	1,88092	7	1,55580	0,93223	0,38122	8	3,30604	0,90927	0,21706
2016-2	0,64354	0,78625	1,29650	7	0,38604	0,96795	1,43447	8	2,00761	0,81933	0,29866
2016-3	0,92017	0,65755	5,08659	7	0,49549	0,92500	1,52394	8	0,43697	0,90393	0,90983
2016-4	0,86834	0,64445	2,76654	7	0,84313	0,96117	5,84391	8	0,65327	0,76005	1,09606
2016-5-SL	0,80365	0,74846	0,62248	7	0,44584	0,94191	0,76261	8	4,47387	0,85476	0,16132
2016-6-ST	0,67213	0,77628	1,42929	7	0,35414	0,94905	0,85450	8	1,86992	0,88394	0,32806
2017-1	0,44596	0,89534	1,02586	7	1,06579	0,96472	0,48297	8	1,83618	0,94041	0,34261
2017-2	0,99021	0,87336	0,52324	7	0,64962	0,93802	0,63062	8	2,14158	0,88834	0,29809
2017-3	0,83537	0,74677	3,09496	7	0,56556	0,96856	2,10254	8	0,47603	0,93309	1,50206
2017-4	0,65627	0,80372	1,52547	7	0,73239	0,92621	3,10480	8	0,53449	0,87496	1,34899
2017-5-SL	1,43699	0,88107	0,39369	7	1,26120	0,94010	0,43637	8	2,97473	0,94250	0,24177
2017-6-SL	0,60528	0,93634	0,65507	7	1,32391	0,96583	0,42658	8	1,67899	0,93696	0,36328
2018-1	0,58078	0,85886	1,46794	7	1,46653	0,94179	0,39750	8	2,09228	0,88881	0,30332
2018-2	0,81618	0,79993	0,59117	7	0,34855	0,94742	0,87272	8	1,90663	0,81941	0,31064
2018-3	0,83407	0,71300	2,72864	7	0,38362	0,92387	0,97214	8	0,41266	0,91385	0,92546
2018-4	0,79247	0,63412	0,78515	7	0,79125	0,96861	4,45492	8	0,64341	0,81038	1,48829
2018-5-SL	1,15731	0,82000	0,44910	7	1,04789	0,95714	0,48729	8	1,47107	0,86228	0,38436
2018-6-ST	0,47178	0,88172	1,00120	7	0,58731	0,96858	0,64544	8	0,66176	0,89891	0,64445

H.2 Kalibrierversuche im IPA-Expositionslabor

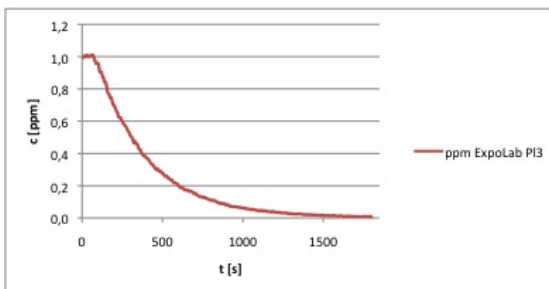
H.2.1 Konzentrationsverläufe der Versuchsdurchgänge



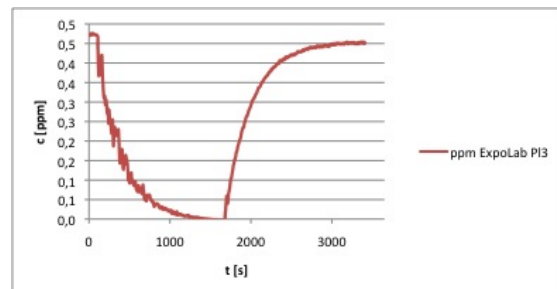
Versuch "Abklingen-Ethylacetat"



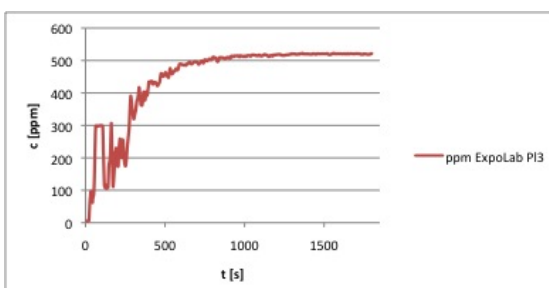
Versuch "Abklingen-Propylen"



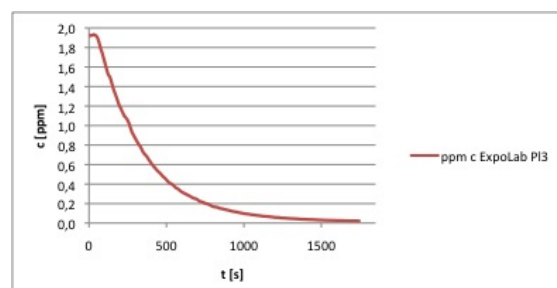
Versuch "Abklingen Propylen"



Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter"



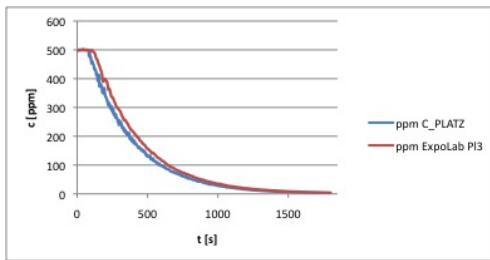
Versuch "Ethylacetat-ExpoLab5"



Versuch "Luftwechsel-ExpoLab-KNV"

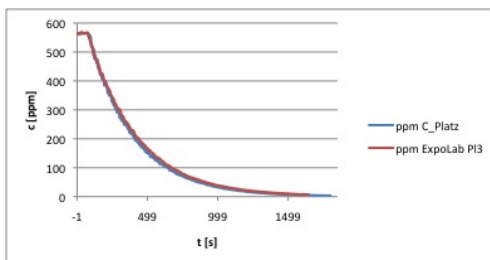
H.2.2 Berechnungen zu Versuchsbedingungen

Versuch "Abklingen-Ethylacetat"



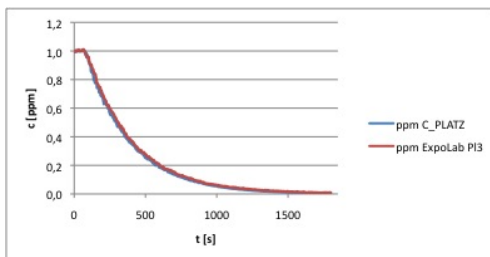
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,10616
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,99764
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,09740

Versuch "Abklingen-Ethylacetat 2"



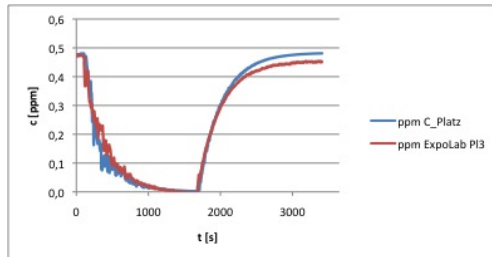
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,03716
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,99950
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,02725

Versuch "Abklingen-Propylen"



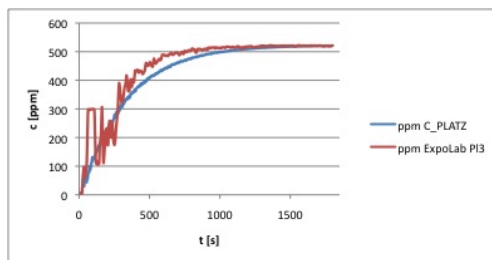
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,03656
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,99960
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,03267

Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter"



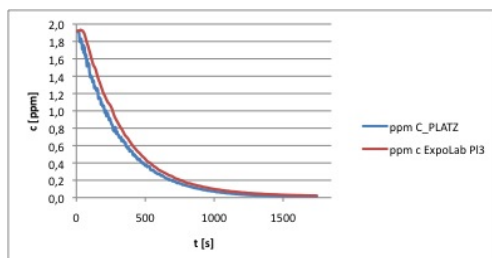
Relative Abweichung $L_2 =$ 0,17571
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,98445
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,00443

Versuch "Ethylacetat-ExpoLab5"



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,09569
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,99600
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,03570

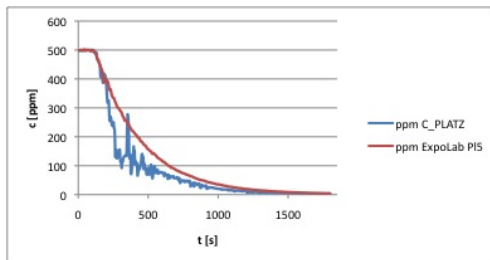
Versuch "Luftwechsel-ExpoLab-KNV"



Relative Abweichung $L_2 =$ 0,12695
 Inneres Produkt $\cos =$ 0,99829
 Projektionskoeffizient $a =$ 1,14095

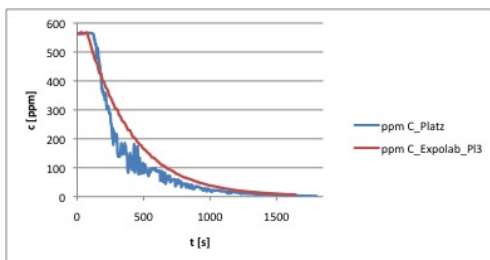
H.2.3 Sensitivitätsuntersuchungen

Versuch "Abklingen-Ethylacetat", ohne Ventilator



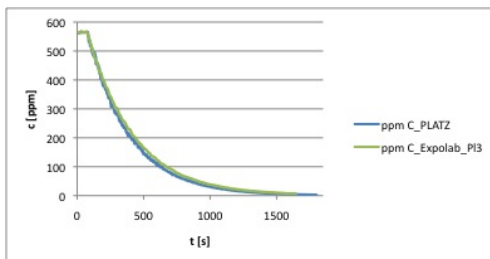
Relative Abweichung $L_2 = 0,24737$
 Inneres Produkt $cos = 0,97268$
 Projektionskoeffizient $a = 1,10604$

Versuch "Abklingen-Ethylacetat 2", ohne Ventilator



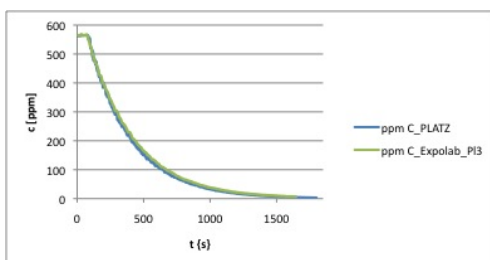
Relative Abweichung $L_2 = 0,21023$
 Inneres Produkt $cos = 0,97877$
 Projektionskoeffizient $a = 1,05983$

Versuch "Abklingen-Ethylacetat 2", Temperatur = 288 K



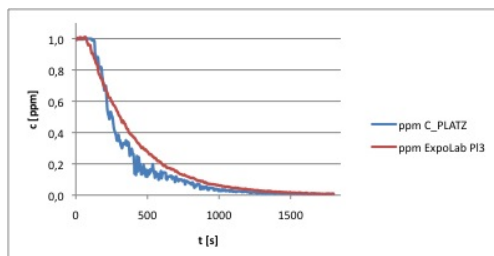
Relative Abweichung $L_2 = 0,05012$
 Inneres Produkt $cos = 0,99907$
 Projektionskoeffizient $a = 1,03477$

Versuch "Abklingen-Ethylacetat 2", relative Luftfeuchte = 55%



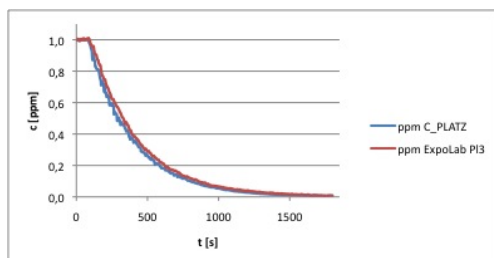
Relative Abweichung $L_2 = 0,03716$
 Inneres Produkt $cos = 0,99948$
 Projektionskoeffizient $a = 1,02725$

Versuch "Abklingen-Propylen", ohne Ventilator



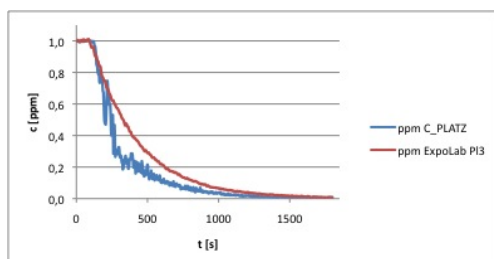
Relative Abweichung $L_2 = 0,17601$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98511$
 Projektionskoeffizient $a = 1,04934$

Versuch "Abklingen-Propylen", mit Personenaufenthalt



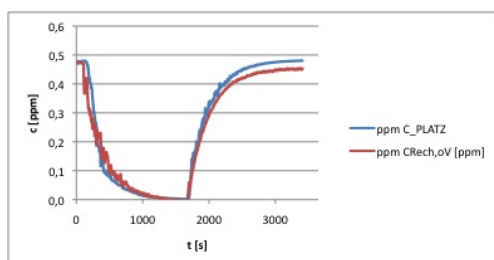
Relative Abweichung $L_2 = 0,07140$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99885$
 Projektionskoeffizient $a = 1,06470$

Versuch "Abklingen-Propylen", ohne Ventilator, mit Personenaufenthalt



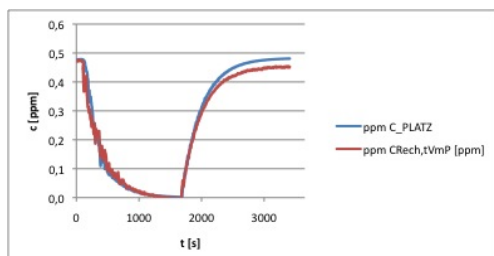
Relative Abweichung $L_2 = 0,24366$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97374$
 Projektionskoeffizient $a = 1,10851$

Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter", ohne Ventilator



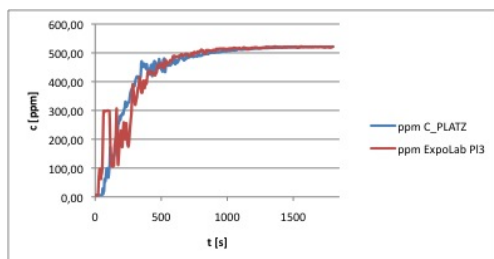
Relative Abweichung $L_2 = 0,20678$
 Inneres Produkt $\cos = 0,98377$
 Projektionskoeffizient $a = 0,91206$

Versuch "Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter", mit Personenaufenthalt



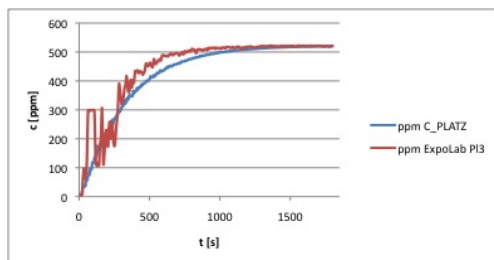
Relative Abweichung $L_2 = 0,13547$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99260$
 Projektionskoeffizient $a = 0,95028$

Versuch "Ethylacetat-ExpoLab5", ohne Ventilator



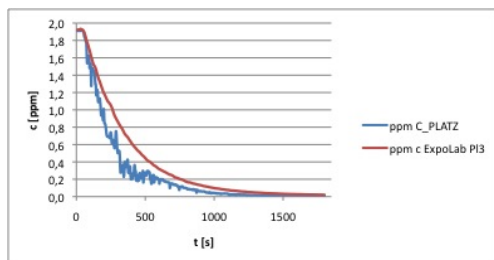
Relative Abweichung $L_2 = 0,11020$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99393$
 Projektionskoeffizient $a = 0,99340$

Versuch "Ethylacetat-ExpoLab5", mit Personenaufenthalt



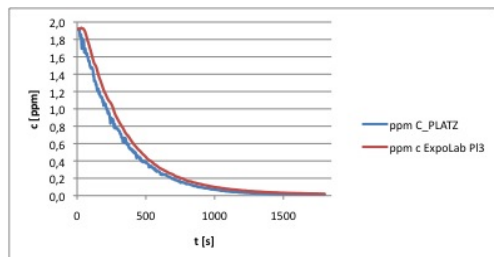
Relative Abweichung $L_2 = 0,09814$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99582$
 Projektionskoeffizient $a = 1,03726$

Versuch "Luftwechsel-ExpoLab-KNV", ohne Ventilator



Relative Abweichung $L_2 = 0,24773$
 Inneres Produkt $\cos = 0,97718$
 Projektionskoeffizient $a = 1,16523$

Versuch "Luftwechsel-ExpoLab-KNV", mit Personenaufenthalt



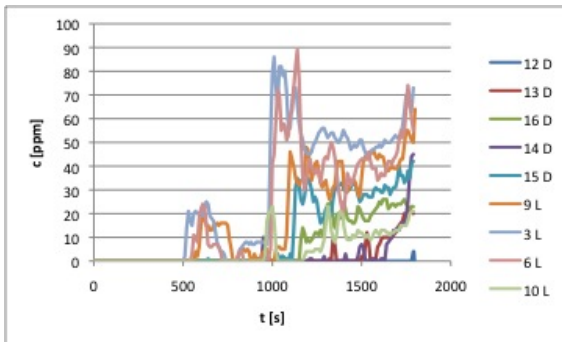
Relative Abweichung $L_2 = 0,11985$
 Inneres Produkt $\cos = 0,99842$
 Projektionskoeffizient $a = 1,13198$

H.2.4 Zusammenfassung statistischer Kennwerte

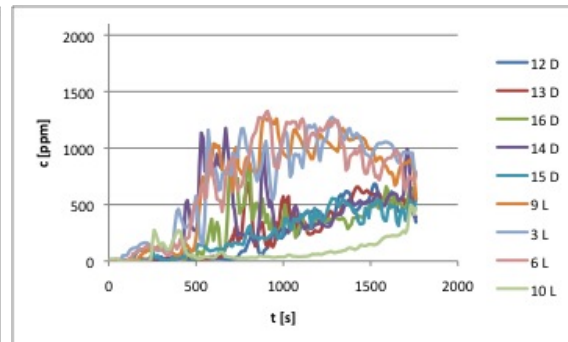
Name Messung	Name FDS	$c - \text{Ziel ppm}$	rel. Differenz	Inn. Produkt	Prof.-Koeff.
Abklingen-Ethylacetat	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk-295KVent	500,00	0,10616	0,99764	1,09740
	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk-295KVent	500,00	0,24737	0,97268	1,10604
Abklingen-Ethylacetat2	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk2-295KVent	565,00	0,21023	0,97877	1,05983
	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk2-295K	565,00	0,03716	0,99948	1,02725
	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk2-288KVent	565,00	0,05120	0,99907	1,03477
	Validierung-Expo-Labor-C4H8O2-Abk2-295KVH55	565,00	0,03716	0,99948	1,02725
Abklingen-Propylen	Validierung-Expo-Labor-C3H6-Abk-295KVent	1,00	0,03656	0,99960	1,03267
	Validierung-Expo-Labor-C3H6-Abk-295K	1,00	0,17601	0,98511	1,04934
	Validierung-Expo-Labor-C3H6-Abk-295KVentmP	1,00	0,07140	0,99885	1,06470
	Validierung-Expo-Labor-C3H6-Abk-295KmP	1,00	0,24366	0,97375	1,10851
Abklingen-Propylen-mit-ohne-Lüfter	Validierung-Expo-Labor-C3H6-AbAn-295KV	0,48	0,17571	0,98445	1,00443
	Validierung-Expo-Labor-C3H6-AbAn-295K	0,48	0,20678	0,98377	0,91205
	Validierung-Expo-Labor-C3H6-AbAn-295KVmP	0,48	0,13547	0,99260	0,95028
Ethylacetat-ExpoLab5	Val-Expo-Labor-C4H8O2-An-295KVent	520,00	0,09569	0,99600	1,03570
	Val-Expo-Labor-C4H8O2-An-295K	520,00	0,11020	0,99393	0,99340
	Val-Expo-Labor-C4H8O2-An-295KVent-mP	520,00	0,09814	0,99582	1,03725
Luftwechsel-ExpoLab-KNV	Validierung-Expo-Labor-C4H10O-Abk-295KVent	1,92	0,12695	0,99829	1,14095
	Validierung-Expo-Labor-C4H10O-Abk-295K	1,92	0,24773	0,97718	1,16523
	Validierung-Expo-Labor-C4H10O-Abk-295KVent-mP	1,92	0,11985	0,99842	1,13198

H.3 Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten

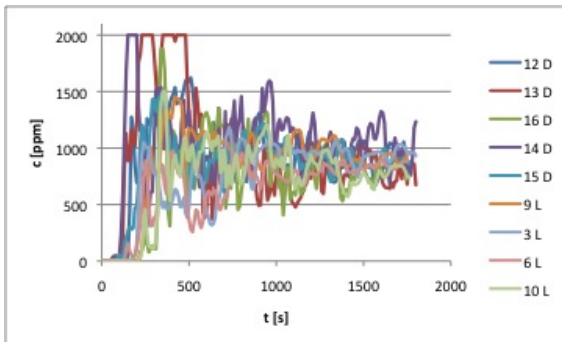
H.3.1 Konzentrationsverläufe der Versuchsdurchgänge



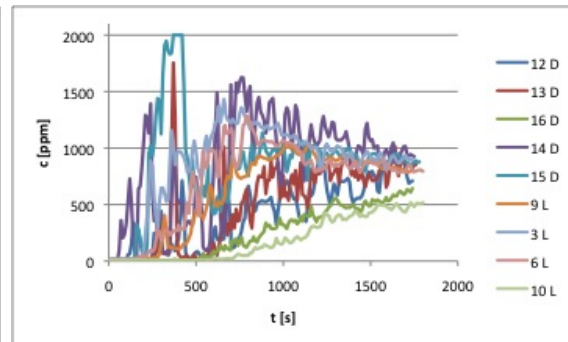
CO-Versuch 1
Konzentrationsverläufe Ebene 1



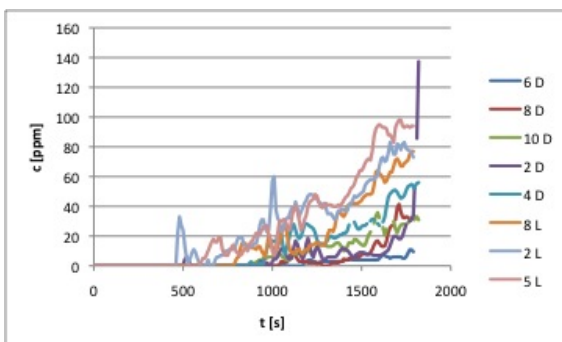
CO-Versuch 2
Konzentrationsverläufe Ebene 1



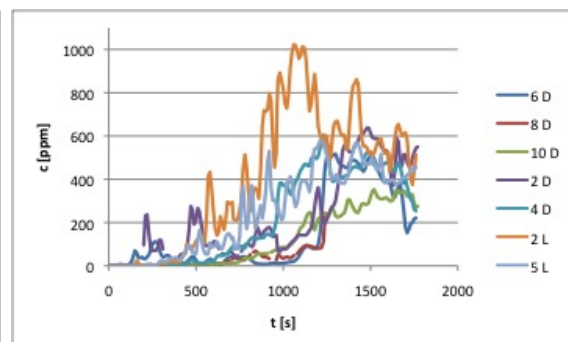
CO-Versuch 3
Konzentrationsverläufe Ebene 1



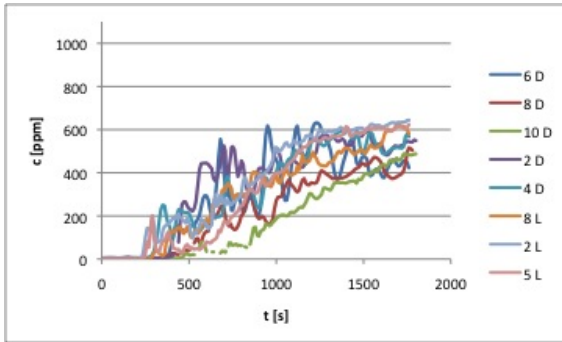
CO-Versuch 4
Konzentrationsverläufe Ebene 1



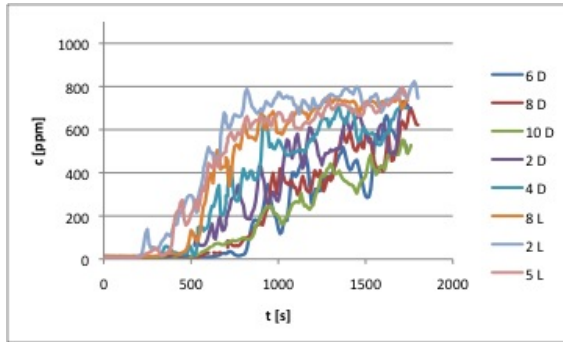
CO-Versuch 1
Konzentrationsverläufe Ebene 2



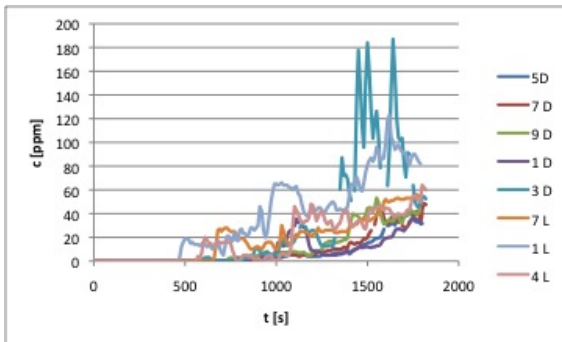
CO-Versuch 2
Konzentrationsverläufe Ebene 2



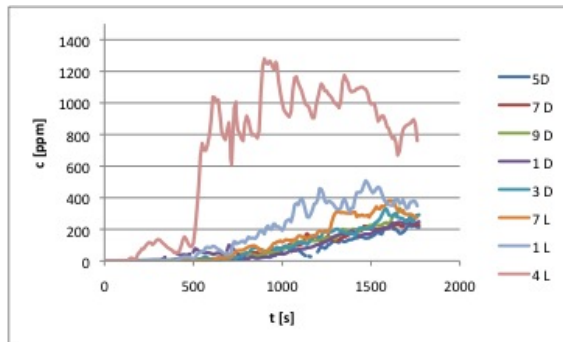
CO-Versuch 3
Konzentrationsverläufe Ebene 2



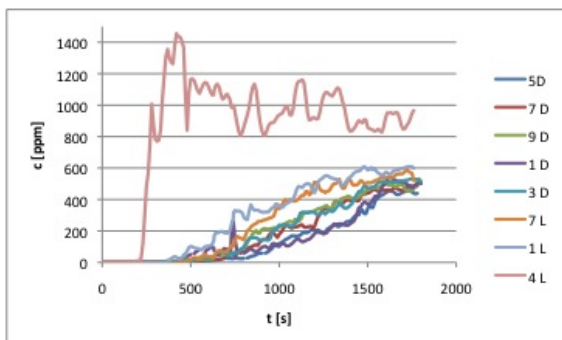
CO-Versuch 4
Konzentrationsverläufe Ebene 2



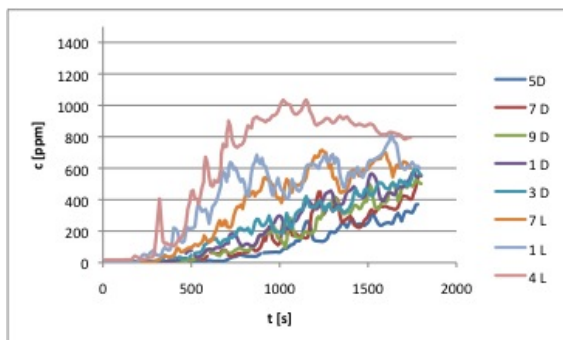
CO-Versuch 1
Konzentrationsverläufe Ebene 3



CO-Versuch 2
Konzentrationsverläufe Ebene 3



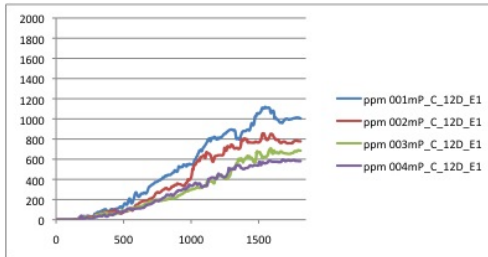
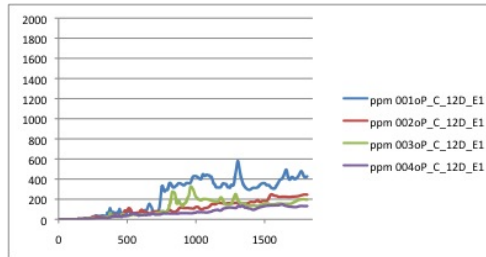
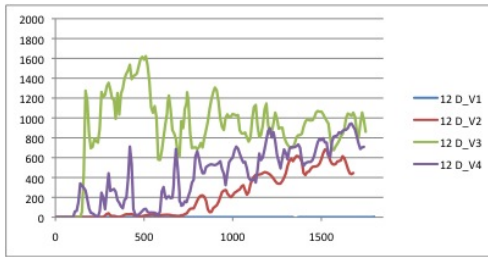
CO-Versuch 3
Konzentrationsverläufe Ebene 3



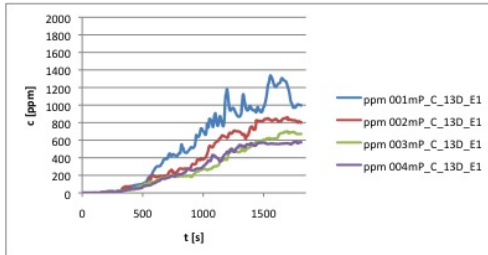
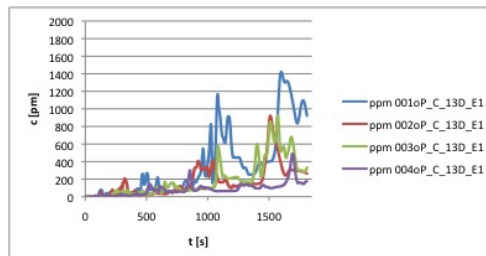
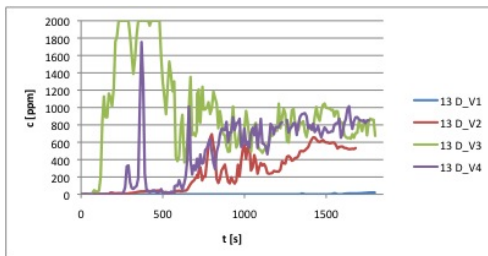
CO-Versuch 4
Konzentrationsverläufe Ebene 3

H.3.2 Ergebnisvergleiche der Versuche mit Berechnungen

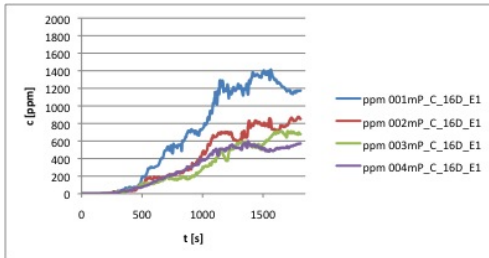
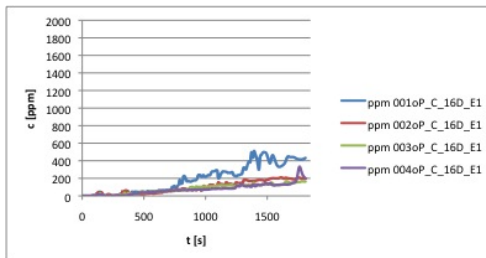
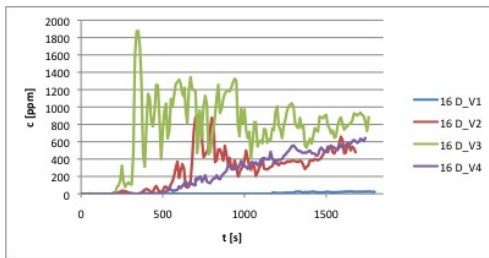
Messpunkt 12D, Ebene 1



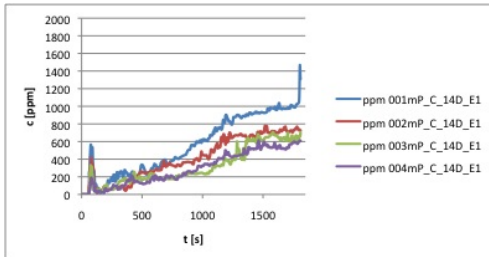
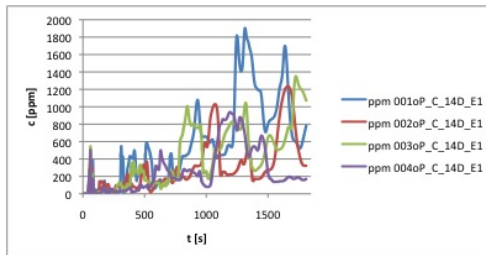
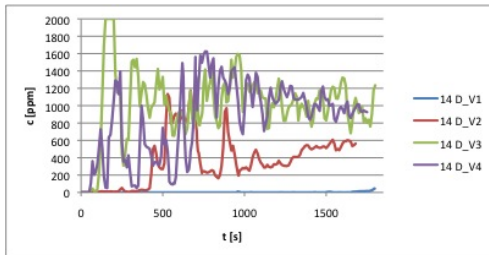
Messpunkt 13D, Ebene 1



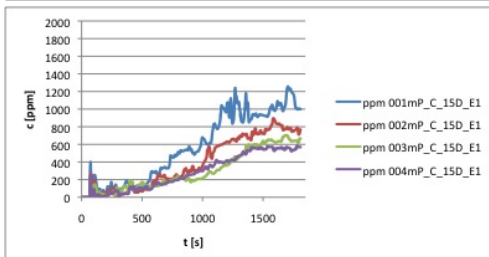
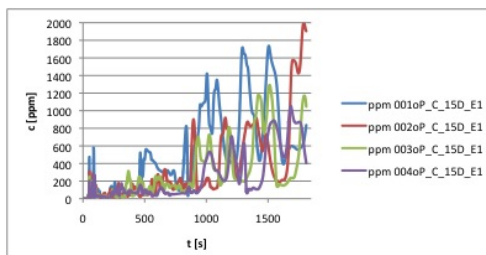
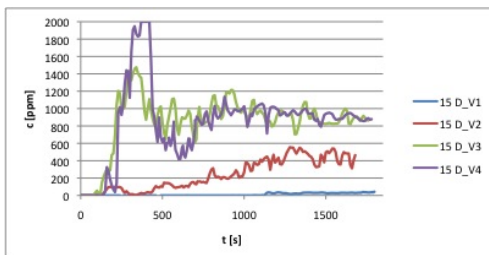
Messpunkt 16D, Ebene 1



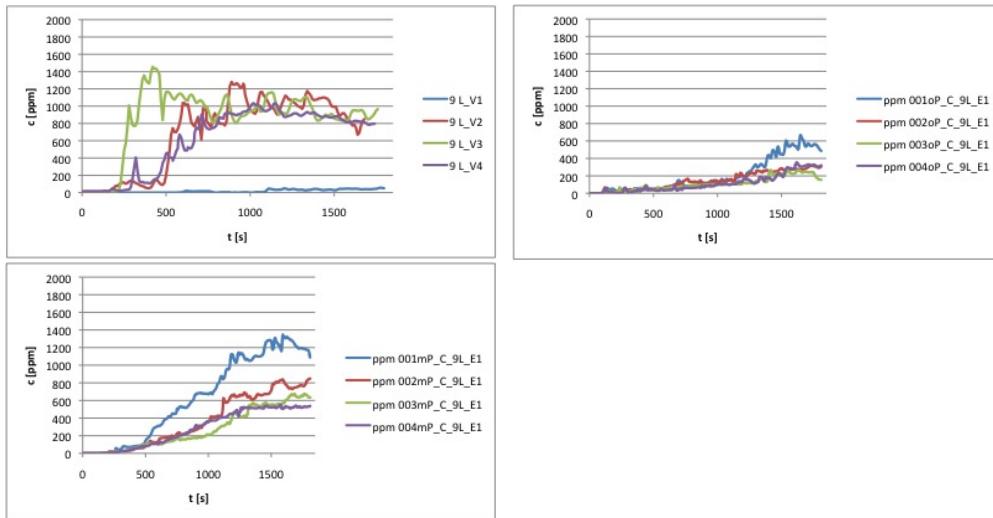
Messpunkt 14D, Ebene 1



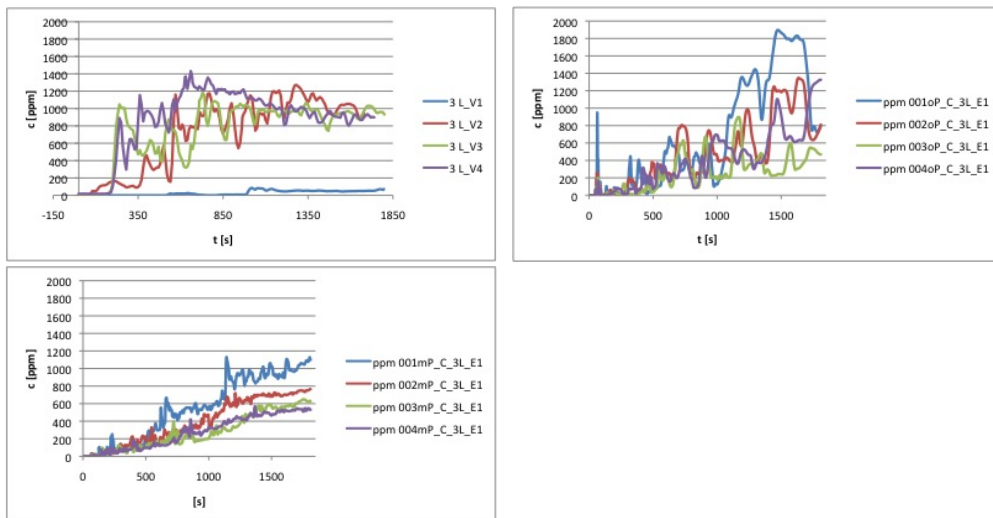
Messpunkt 15D, Ebene 1



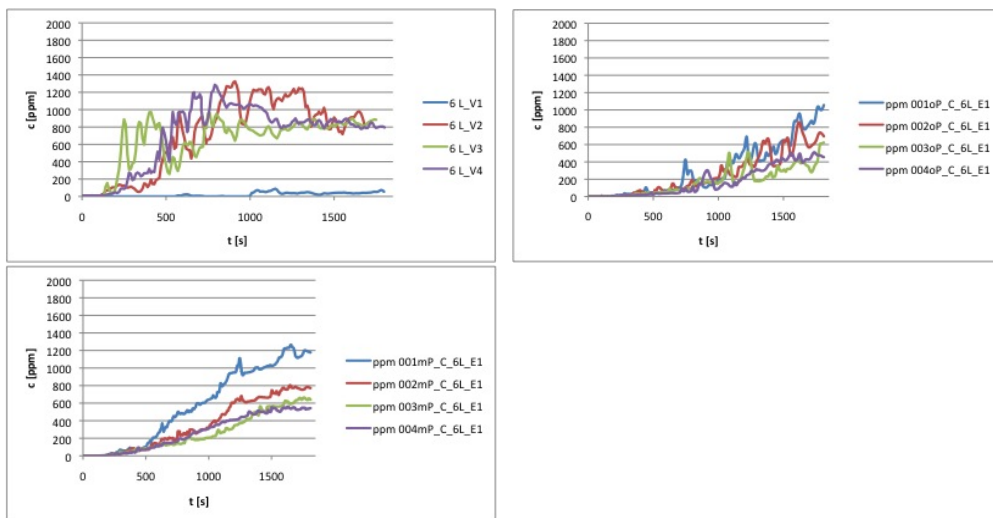
Messpunkt 9L, Ebene 1



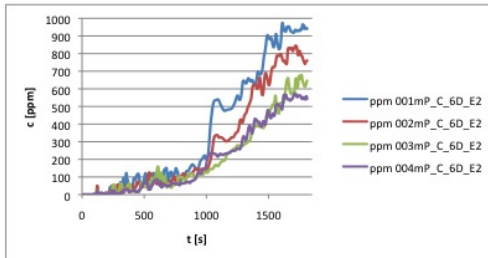
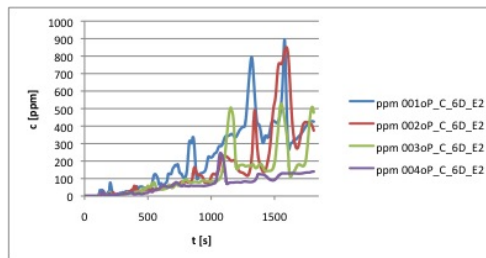
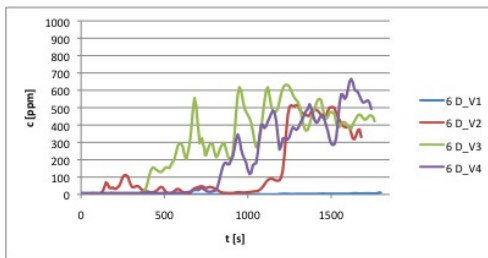
Messpunkt 3L, Ebene 1



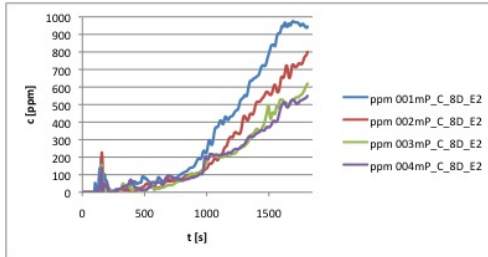
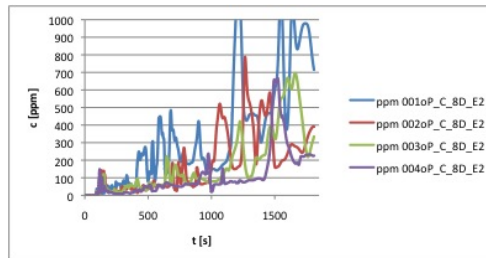
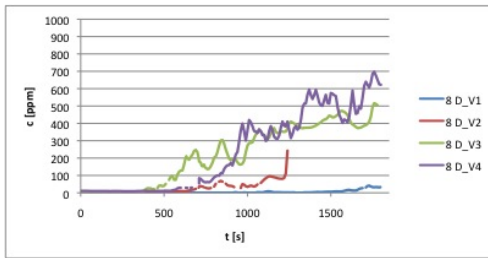
Messpunkt 6L, Ebene 1



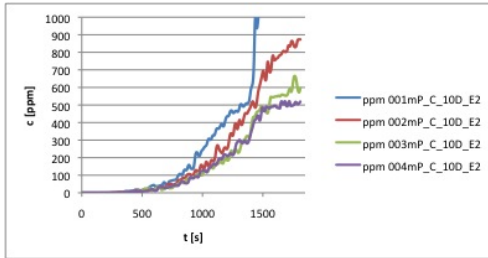
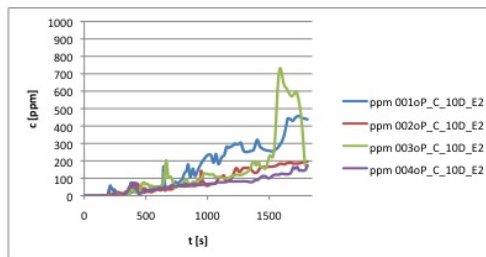
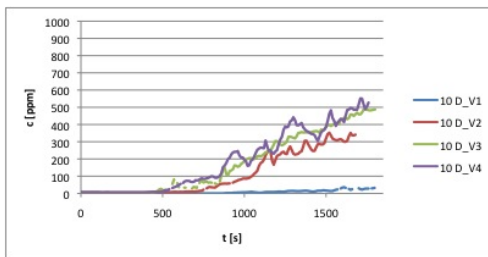
Messpunkt 6D, Ebene 2



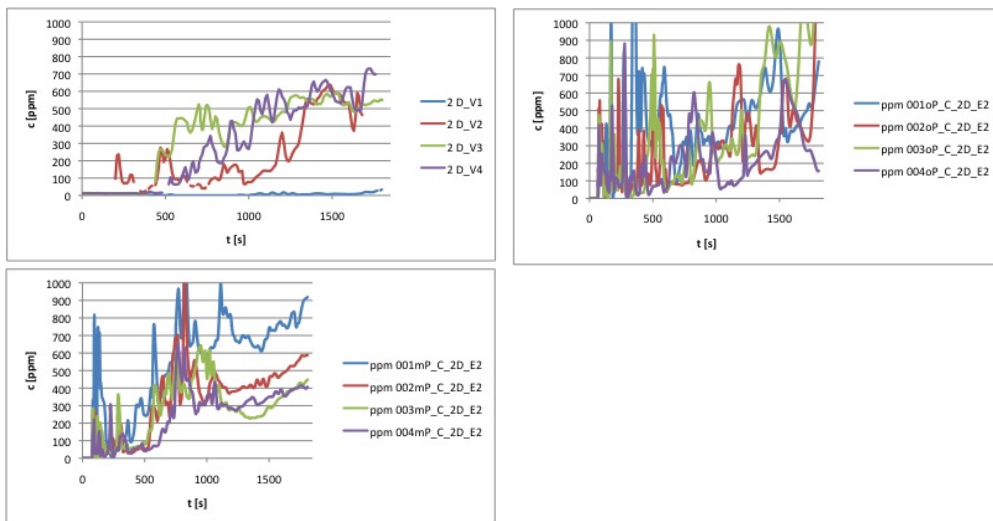
Messpunkt 8D, Ebene 2



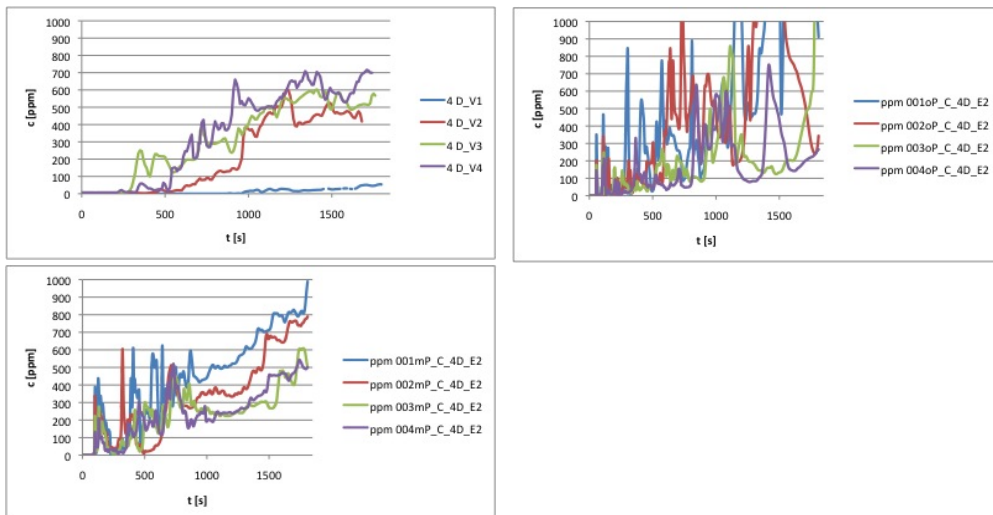
Messpunkt 10D, Ebene 2



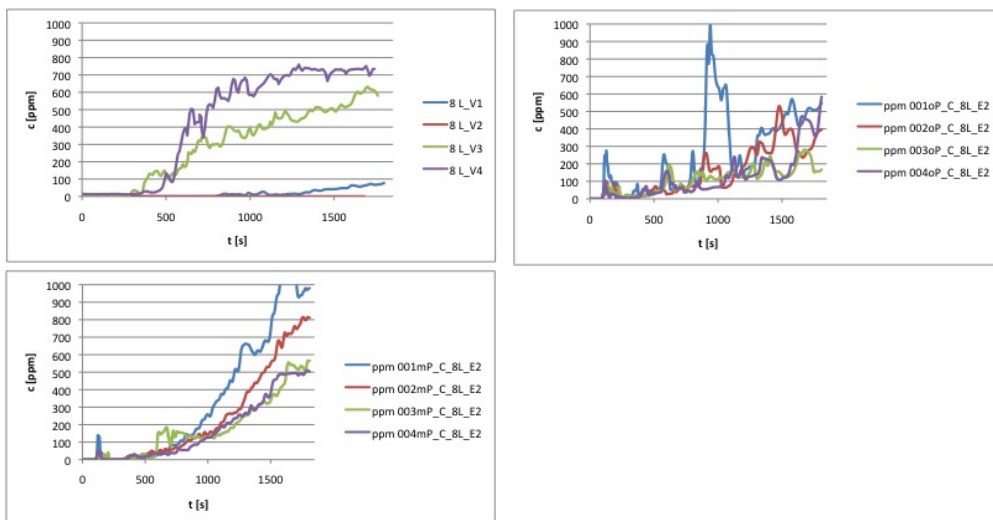
Messpunkt 2D, Ebene 2



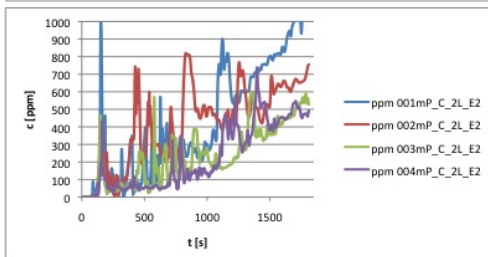
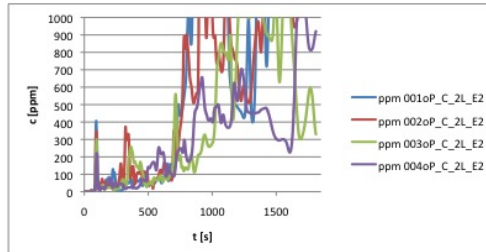
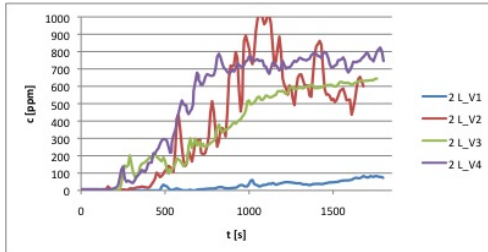
Messpunkt 4D, Ebene 2



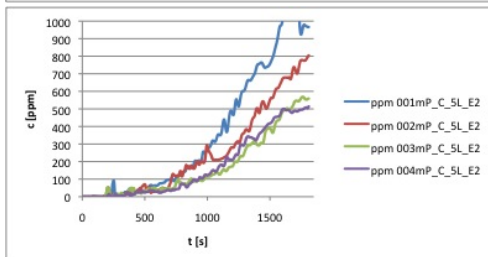
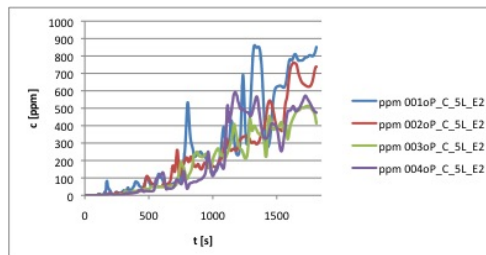
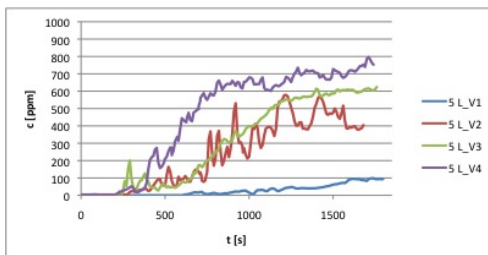
Messpunkt 8L, Ebene 2



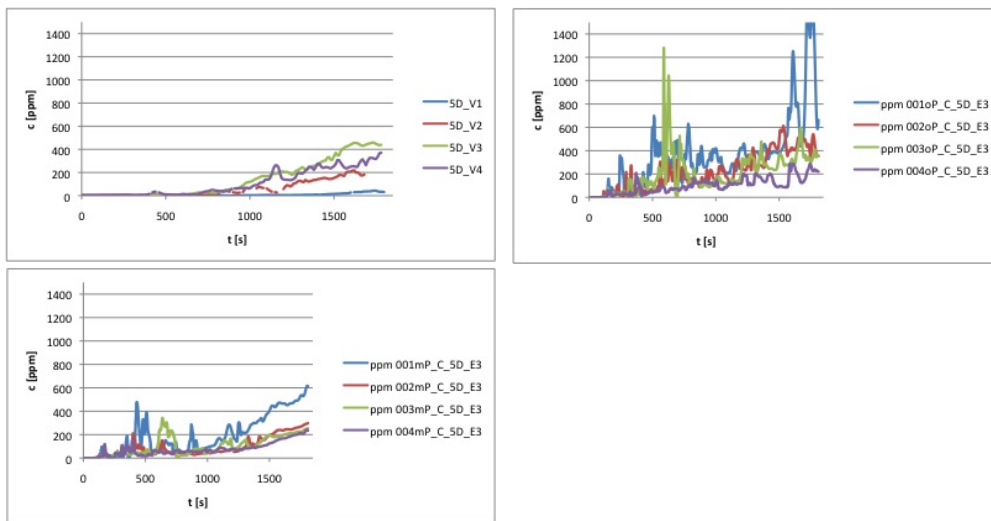
Messpunkt 2L, Ebene 2



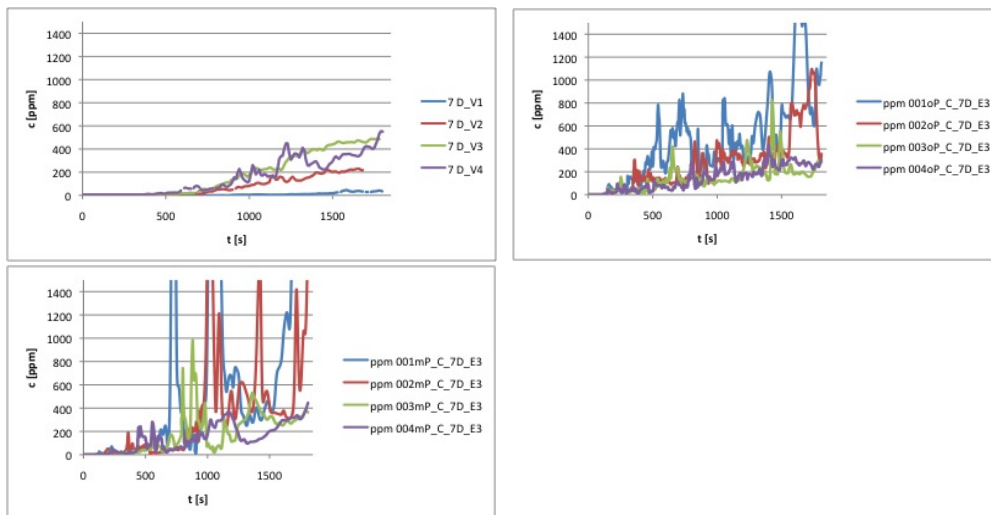
Messpunkt 5L, Ebene 2



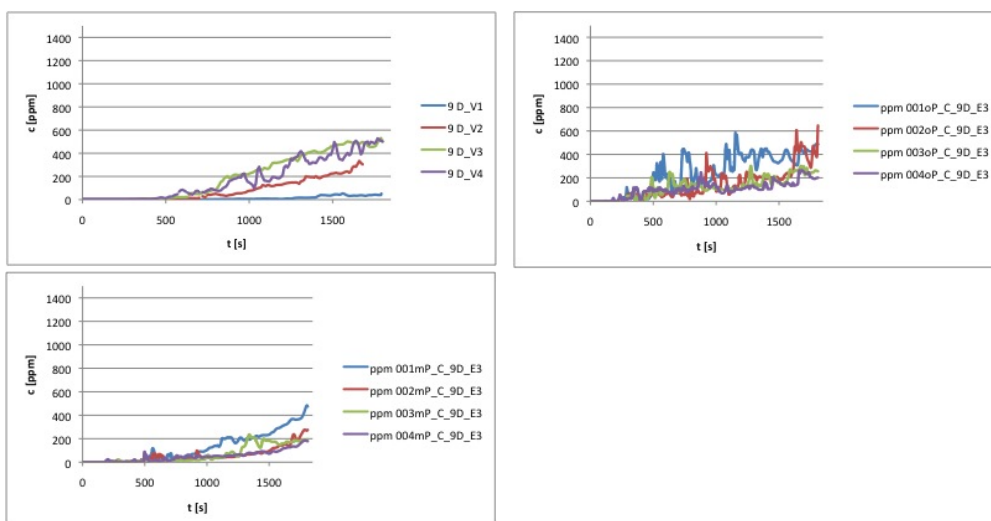
Messpunkt 5D, Ebene 3



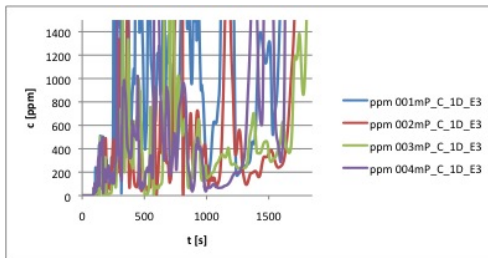
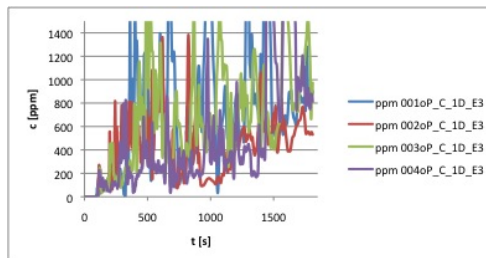
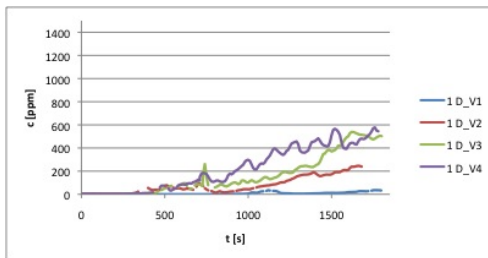
Messpunkt 7D, Ebene 3



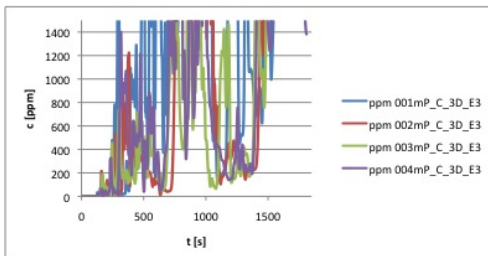
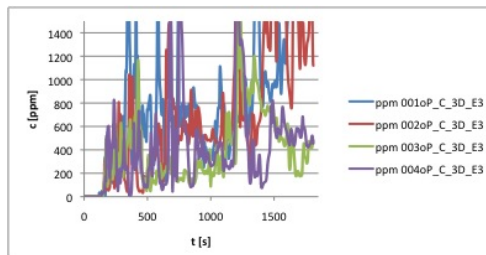
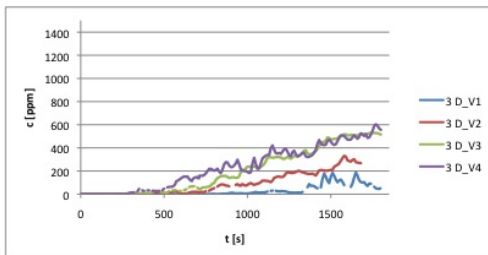
Messpunkt 9D, Ebene 3



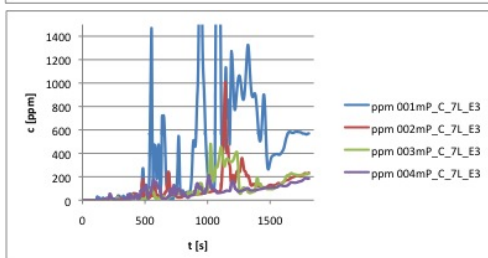
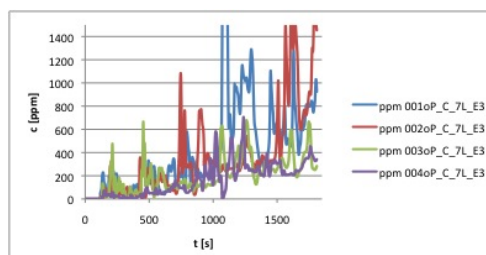
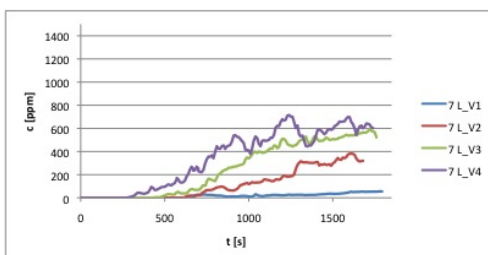
Messpunkt 1D, Ebene 3



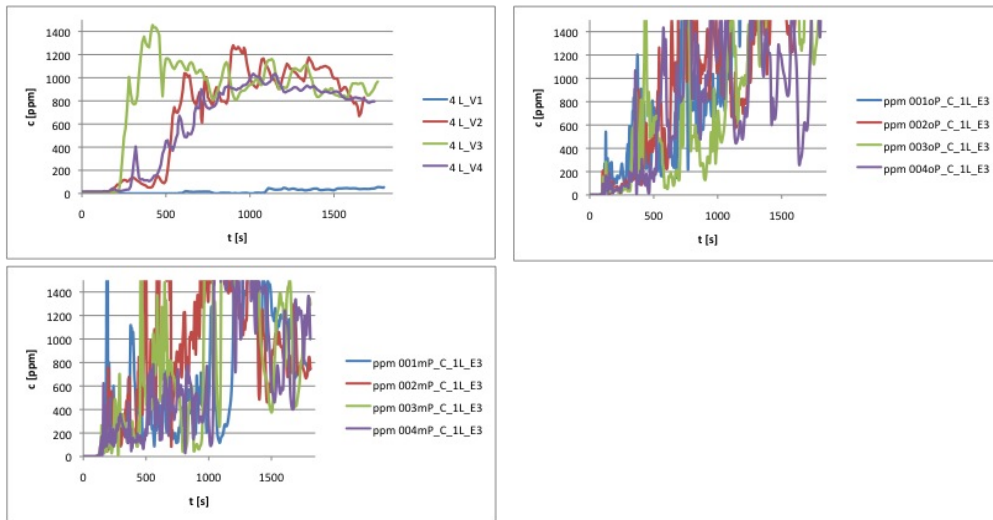
Messpunkt 3D, Ebene 3



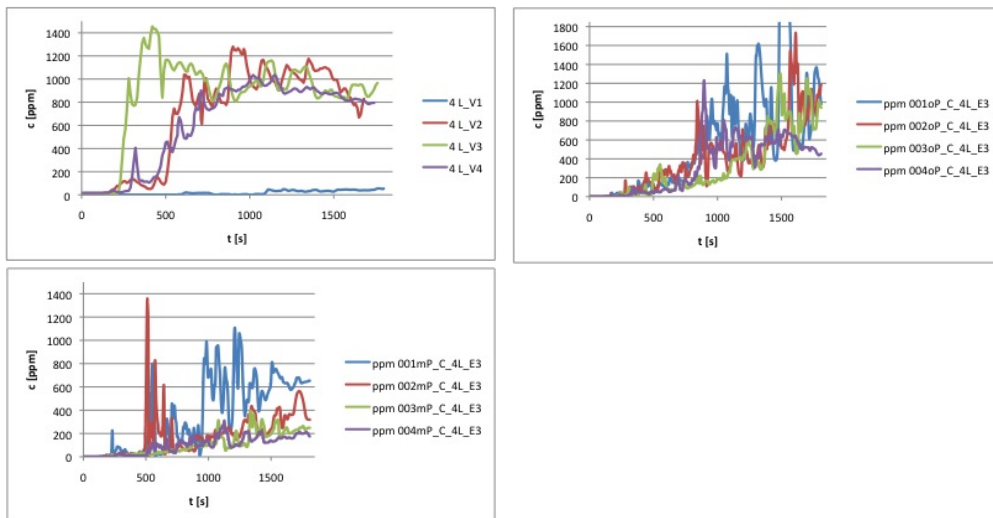
Messpunkt 7L, Ebene 3



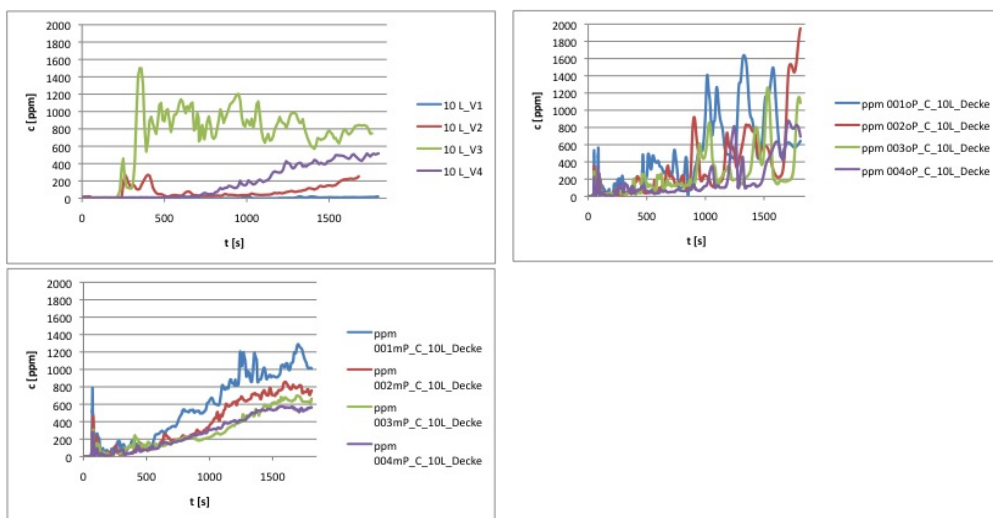
Messpunkt 1L, Ebene 3



Messpunkt 4L, Ebene 3



Messpunkt 10L, Decke



Verwendete Formelzeichen

a	$[m/s^2]$	Beschleunigung Strömung	Charakteristischer Parameter
a	$[-]$	Projektionskoeffizient	Zeitreihenanalyse mit multidimensionalen Vektoren
A	$[m^2]$	Emissionsfläche und -geometrie	Charakteristischer Parameter
A	$[m^2]$	Öffnungsfläche	Charakteristischer Parameter
A	$[m^2]$	Größe Oberfläche	Charakteristischer Parameter
$A_{L,ab}$	$[m^2]$	Fläche Abluft	Charakteristischer Parameter
$A_{L,ein}$	$[m^2]$	Fläche Zuluft	Charakteristischer Parameter
$A_{L,M}$	$[m^2]$	Flächen Zu- und Abluft Betriebsmittel	Charakteristische Parameter
$A_{M,Ob}$	$[K]$	Thermisch wirksame Oberfläche Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
A_M	$[K]$	Oberfläche Person	Charakteristischer Parameter
$A_{aeq,ges,i}$	$[m^2]$	äquivalente Gesamtfläche der Zu- bzw. Abluftöffnungen	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
$A_{ges,Zu}$	$[m^2]$	gesamte Zuluftfläche	Bestimmung flächenspezifischer Massenströme aus Massenanteilen
A_i	$[m^2]$	Oberfläche Flüssigkeit i	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell
A_{Oeff}	$[m^2]$	Öffnungsfläche in Behälter	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
Ar	$[-]$	Archimedes-Zahl	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
AGW	$[ppm]$, $[mg/m^3]$	Arbeitsplatzgrenzwert	Grenzwertkonzept nach TRGS 900
c_{Saett}	$[kg/m^3]$	Stoffspezifische Dampfsättigungskonzentration	Charakteristischer Parameter
c	$[kg/m^3]$, $[ppm]$	Stoffkonzentration	Umrechnung von $[ppm]$ in $[mg/m^3]$
$c_{ges,t=0}$	$[kg/m^3]$	gesamte Gas-Massenkonzentration zu Versuchsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
$c_{i,t=0}$	$[mg/m^3]$	Massenkonzentration Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
$c_{i,ppm}$	$[ppm]$	Zielwert Volumenkonzentration Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
$c_{Luft,ppm}$	$[ppm]$	Volumenkonzentration Luft zu Betrachtungsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
$c_{Luft,t=0}$	$[mg/m^3]$	Massenkonzentration Luft zu Betrachtungsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
c_w	$[-]$	Aerodynamischer Korrekturfaktor	Charakteristischer Parameter
c_p	$[kJ/(kg K)]$	Spezifische Wärmespeicherkapazität Flüssigkeit	Charakteristischer Parameter
$c_{MW,gl}(t)$	$[mg/m^3]$	zeitabhängige Luftkonzentration, gleitender Mittelwert	Berechnung gleitender Mittelwert
$c(t-i)$	$[mg/m^3]$	zeitabhängiger Einzelwert der Luftkonzentration	Berechnung gleitender Mittelwert
C_d	$[-]$	Kontraktionskoeffizient zur Berücksichtigung von Einschnüreffekten von Strömungen an Öffnungen	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
d	$[m]$	Durchmesser Emissionsdüse	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
D_i	$[m^2/s]$	Spezifischer Diffusionskoeffizient	Charakteristischer Parameter

$D_{i,g}$	$[cm^2/s]$	Diffusionskoeffizient Stoff i in Umgebungsluft	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
D_i	$[m^2/s]$	Diffusionskoeffizient Stoff i in Umgebungsluft	Diffusionsmodell
E	$[-]$	Kennbuchstabe Messwert	Zeitreihenanalyse mit multidimensionalen Vektoren
h	$[J/kg]$	Spezifische Enthalpie	Charakteristischer Parameter
k	$[cm/s]$	Stofftransportkoeffizient	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu
m	$[-]$	Mischzahl	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
m	$[-]$	Kennbuchstabe Berechnungsergebnis	Zeitreihenanalyse mit multidimensionalen Vektoren
m	$[g]$	Stoffmasse	Ideale Gasgleichung
$m(t_{i-1})$	$[g]$	Masse innerhalb des Behälters zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt i-1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
\dot{m}	$[g/s]$	Emissions-Massenstrom	Charakteristischer Parameter
\dot{m}_∞	$[kg/s]$	Resultierender Massenstrom der Umgebungsluft in Strömung	Charakteristischer Parameter
$\dot{m}_{L,ab}$	$[kg/s]$	Abluft-Massenstrom	Charakteristischer Parameter
$\dot{m}_{L,ein}$	$[kg/s]$	Zuluft-Massenstrom	Charakteristischer Parameter
$\dot{m}_{L,M}$	$[kg/s]$	Zuluft und Abluft-Massenströme Betriebsmittel	Charakteristische Parameter
$\dot{m}_{M,L}$	$[kg/s]$	Aus Bewegung resultierender Massenstrom Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
$\dot{m}_{ges,Zu}$	$[kg/s]$	gesamter Zuluft-Massenstrom	Bestimmung flächenspezifischer Massenströme aus Massenanteilen
$\dot{m}(t_{i-1})$	$[g/s], [kg/s]$	Emissions-Massenstrom aus Behälter zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt i-1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
\dot{m}_i	$[g/s]$	Emissions-Massenstrom des Stoffes i	Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs
$\dot{m}_{i,Diff}$	$[mg/h]$	Emissions-Massenstrom diffundierender Stoff	Diffusionsmodell
$\dot{m}_{i,Em}$	$[mg/h]$	Emissions-Massenstrom Stoff i	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
\dot{m}''_i	$[kg/(s m^2)]$	flächenspezifischer Massenstrom der Zu- oder Abluft	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
$\dot{m}'''_{i,Zu}$	$[kg/(s m^2)]$	flächenspezifischer Emissions-Massenstrom des Versuchsstoffs	Bestimmung flächenspezifischer Massenströme aus Massenanteilen
M	$[-]$	MACH-Zahl als Relation lokaler Strömungsgeschwindigkeiten zur spezifischen Schallgeschwindigkeit	Ausbreitungsmodell FDS
M	$[g/mol]$	Molekulargewicht Stoff	Charakteristischer Parameter
M_∞	$[g/mol]$	Molekulargewicht Umgebungsatmosphäre	Charakteristischer Parameter
M_i	$[g/mol]$	Molekulargewicht Stoff	Charakteristischer Parameter
M	$[g/mol]$	Molare Masse des Stoffes	Ideale Gasgleichung
M	$[g/mol]$	Molare Stoffmasse	Diffusionsmodell
M_i	$[g/mol]$	Molare Masse eines Stoffes bzw. Flüssigkeit i	CEM-Modell Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
n	$[-]$	Anzahl Einzelwerte, die in Mittelwertberechnung einbezogen werden ("Dämpfungsfaktor")	Berechnung gleitender Mittelwert
p	$[Pa]$	Strömungsmechanischer Druck	Charakteristischer Parameter
p_∞	$[Pa]$	Umgebungsdruck	Charakteristischer Parameter
p_{Saett}	$[Pa]$	Stoffspezifischer Sättigungsdampfdruck	Charakteristischer Parameter
p_{Sub}	$[Pa]$	Spezifischer Sublimationsdruck	Charakteristischer Parameter
p	$[Pa]$	Druck des Gases	Ideale Gasgleichung
p	$[Pa]$	Stationärer Druck innerhalb des Betrachtungsvolumens	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
p	$[Pa]$	Orts- und zeitabhängiger strömungsmechanischer Druck	Ausbreitungsmodell FDS

p_{atm}	[Pa]	Umgebungsdruck	SVP-Modell CEM-Modell Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Diffusionsmodell
$p_{evap,i}$	[Pa]	Sättigungsdampfdruck des Stoffes bzw. Flüssigkeit i	SVP-Modell Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
$p(t_i)$	[Pa]	Behälter-Innendruck zum Betrachtungszeitpunkt i	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
$p(t_{i-1})$	[Pa]	Behälter-Innendruck zum vorherigen Betrachtungszeitpunkt i-1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
\dot{Q}	[W]	Wärmeeintrag in Flüssigkeit bzw. Energiebilanz	Charakteristischer Parameter
\dot{Q}	[W]	Wärmeleitung innerhalb Fluid	Charakteristischer Parameter
$\dot{Q}_\infty(t)$	[kJ/(m ² s)]	Zeitabhängige Wärmestromdichte auf Oberfläche	Theoretisches Verdampfungsmodell
r	[m]	Betrachtungsabstand Diffusion zu Emissionspunkt	Diffusionsmodell
R	[(Pa m ³)/(mol K)]	Allgemeine Gaskonstante	Ideale Gasgleichung CEM-Modell Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
s	[m]	Überströmungslänge	Charakteristischer Parameter
s	[J/kg]	Entropie	Charakteristischer Parameter
t	[s]	Zeit	Diffusionsmodell
t_i	[s]	Betrachtungszeitpunkt i	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
t_{i-1}	[s]	Betrachtungszeitpunkt i-1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
t_0	[h]	Zeitpunkt Emissionsbeginn	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
t_1	[h]	Betrachtungszeitpunkt	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
T	[K]	Temperatur der Emission	Charakteristischer Parameter
T	[K]	Temperatur der Komponenten bzw. des Stoffes	Charakteristischer Parameter
T_∞	[K]	Umgebungstemperatur bzw. Temperatur Umgebungsatmosphäre	Charakteristischer Parameter
$T_{fl,boil}$	[K]	Spezifischer Siedepunkt Flüssigkeit	Charakteristischer Parameter
$T_{M,Ob}$	[K]	Oberflächentemperatur Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
$T_{M,P}$	[K]	Oberflächentemperatur Person	Charakteristischer Parameter
T_{Sub}	[K]	Spezifische Sublimationstemperatur	Charakteristischer Parameter
T	[K]	Absolute Stofftemperatur	Ideale Gasgleichung
T_∞	[K]	Temperatur Umgebungsluft	Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs
T	[K]	Umgebungstemperatur	CEM-Modell Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Diffusionsmodell
T_{akt}	[K]	aktuelle Umgebungstemperatur	Umrechnung von [ppm] in [mg/m ³]
T_{Bezug}	[K]	Bezugstemperatur	Umrechnung von [ppm] in [mg/m ³]
T_i	[K]	Temperatur Stoff i	Abschätzung des dichtebedingten Auf- oder Abtriebs
T_R	[K]	Lufttemperatur Versuchsraum	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
T_V	[K]	Verdunstungs- bzw. (Flüssigkeits-) Temperatur	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
v	[m/s]	Emissions-Geschwindigkeit	Charakteristischer Parameter
v	[m/s]	Strömungsmechanische Geschwindigkeit	Charakteristischer Parameter

v	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit oberhalb Oberfläche	Charakteristischer Parameter
$v_{L,ab}$	$[m/s]$	Abluft-Geschwindigkeit	Charakteristischer Parameter
$v_{L,ein}$	$[m/s]$	Zuluft-Geschwindigkeit	Charakteristischer Parameter
$v_{L,M}$	$[m/s]$	Zuluft- und Abluft-Geschwindigkeiten Betriebsmittel	Charakteristische Parameter
$v_{M,L}$	$[m/s]$	Bewegungsgeschwindigkeit Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
v_0	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit Emission	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
v_{air}	$[cm/s]$	Luftgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu
v_a	$[m/s]$	Luftgeschwindigkeit oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
v_x	$[m/s]$	Strömungsgeschwindigkeit in Freistrahlmittelachse	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
$\dot{V}_{L,ab}$	$[m^3/s]$	Abluft-Volumenstrom	Charakteristischer Parameter
$\dot{V}_{L,ein}$	$[m^3/s]$	Zuluft-Volumenstrom	Charakteristischer Parameter
$\dot{V}_{L,M}$	$[m^3/s]$	Zuluft- und Abluft-Volumenströme Betriebsmittel	Charakteristische Parameter
$\dot{V}_{M,L}$	$[m^3/s]$	Aus Bewegung resultierender Volumenstrom Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
\dot{V}_{air}	$[m^3/h]$	Volumenstrom Zu- bzw. Abluft Betrachtungsraum	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
$\dot{V}_{air,NF}$	$[m^3/h]$	Volumenstrom Luftaustausch der Kontrollvolumen (Quellterm)	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
\dot{V}_{em}	$[m^3/s]$	Emissions-Volumenstrom	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
\dot{V}_x	$[m^3/s]$	Abstandsabhängiger Volumenstrom in Freistrahlmittelachse	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
V	$[m^3]$	ingenommenes Gasvolumen	Ideale Gasgleichung
$V_{A,liq}$	$[m^3]$	Volumen der Flüssigkeit A	CEM-Modell
V_B	$[m^3]$	Behältervolumen	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
V_K	$[m^3]$	Größe der Kontrollvolumen	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
V_R	$[m^3]$	Raumvolumen	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
V_R	$[m^3]$	Volumen Betrachtungsraum	CEM-Modell
x	$[m]$	Abstand Betrachtungs- zu Emissionspunkt auf Freistrahlmittelachse	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
x_0	$[m]$	Kernlänge Freistrahlmittelachse	Modell des Freistrahls (Strahlgesetze)
x_i	$[-]$	Molenbruch Komponente i in Flüssigkeit	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
x_i	$[-]$	Massenanteil des Versuchsstoffs	Bestimmung flächenspezifischer Massenströme aus Massenanteilen
$x_{i,t=0}$	$[-]$	Massenanteil Versuchsstoff zu Betrachtungsbeginn	Bestimmung von Massenanteilen
$x_{i,ex}$	$[g/m^3]$	Anfangskonzentration Stoff i in Umgebungsluft	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
X	$[m]$	Länge Flüssigkeitsoberfläche	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
a	$[m]$	Äußere Abmessungen	Charakteristische Parameter
b			
h			
a_B	$[m]$	Unterzüge, Versprünge, Stützen und weitere Bauteile	Charakteristische Parameter
b_B			
h_B			
a_M	$[m]$	Betriebstechnische Einbauten	Charakteristische Parameter
b_M			
h_M			
u, v, w	$[m/s]$	Dreidimensionale Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit	Ausbreitungsmodell FDS
x, y, z	$[m]$	Bewegungsrichtung von Betriebsmitteln	Charakteristischer Parameter
α	$[1/K]$	Volumenausdehnungskoeffizient	Charakteristischer Parameter

γ	[-]	Isentropenexponent: Verhältnis zwischen Wärmespeicherkapazität bei konstantem Druck und konstantem Volumen eines Gases	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
γ_i	[-]	Aktivitätskoeffizient Komponente i in Flüssigkeit	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
$\varepsilon_{M,Ob}$	[-]	Emissionsgrad Wärmestrahlung Betriebsmittel	Charakteristischer Parameter
$\varepsilon_{M,P}$	[-]	Emissionsgrad Wärmestrahlung Person	Charakteristischer Parameter
η_∞	[kg/(m s)]	Dynamische Viskosität Umgebungsatmosphäre	Charakteristischer Parameter
η	[kg/(m s)]	Spezifische Viskosität	Charakteristischer Parameter
η	[kg/(m s)]	Dynamische Viskosität Umgebungsluft	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu
λ	[1/h]	Luftwechselzahl	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
λ_R	[1/h]	Luftwechselzahl Betrachtungsraum	Zonenmodelle des Arbeitsschutzes
ν	[m ² /h]	Kinematische Viskosität Umgebungsluft Luft	Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling
ρ	[kg/m ³]	Gasdichte bzw. Dichte des Fluids	Charakteristischer Parameter
ρ_∞	[kg/m ³]	Dichte Umgebungsatmosphäre	Charakteristischer Parameter
ρ_i	[kg/m ³]	Stoffdichte	Charakteristischer Parameter
ρ_{va}	[kg/m ³]	Dichte Dampf	Charakteristischer Parameter
ρ	[g/m ³]	Stoffdichte	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu
ρ_∞	[kg/m ³]	Dichte Umgebungsluft	Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs
$\rho_{A,liq}$	[g/l]	Dichte der Flüssigkeit A	CEM-Modell
ρ_{Bezug}	[kg/m ³]	Stoffdichte bei Bezugstemperatur	Umrechnung von [ppm] in [mg/m ³]
ρ_i	[kg/m ³]	Stoffdichte	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
			Abschätzung des dichtebedingten Auf- bzw. Abtriebs
ρ_{i,T_∞}	[kg/m ³]	Dichte Versuchsstoff bei Umgebungstemperatur	Bestimmung von Massenanteilen
$\rho_{Luft,0^\circ C}$	[kg/m ³]	Dichte Luft bei 0°C bzw. 273,15 K	Berechnung flächenspezifischer Massenströme
ρ_{Luft,T_∞}	[kg/m ³]	Dichte Luft bei Umgebungstemperatur	Bestimmung von Massenanteilen
$\rho_{T_{akt}}$	[kg/m ³]	Stoffdichte bei aktueller Umgebungstemperatur	Umrechnung von [ppm] in [mg/m ³]
$\rho(t_i)$	[kg/m ³]	Dichte innerhalb des Behälters zum Betrachtungszeitpunkt i	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
ω	[1/s]	Wirbelstärke	Charakteristischer Parameter
Δc	[g/m ³]	Örtlicher Konzentrationsgradient	Charakteristischer Parameter
ΔH_{Sub}	[kJ/kg]	Spezifische Sublimationsenthalpie	Charakteristischer Parameter
ΔH_V	[kJ/kg]	Spezifische Verdampfungsenthalpie Flüssigkeit	Charakteristischer Parameter
Δh_c	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie	Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell
Δh_{Sub}	[kJ/kg]	Sublimationsenthalpie	Theoretisches Verdampfungs- und Sublimationsmodell
Δt	[s]	Zeitschrittweite zwischen den Betrachtungszeitpunkten i und i-1	Modell zur Gas-Emission aus Behältern
ΔT	[K]	Örtlicher Gradient Stoff- zu Umgebungstemperatur	Charakteristischer Parameter
Δz	[cm]	Länge Luft-Flüssigkeits-Grenzschicht in Strömungsrichtung	Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu
$\nabla u, \nabla v, \nabla w$	[m/s]	Orts- und zeitabhängige Änderung dreidimensionale Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit	Ausbreitungsmodell FDS
$\frac{\ \vec{E} - \vec{m}\ }{\ \vec{E}\ }$	[-]	Relative Abweichung nach L ₂ -Norm	Zeitreihenanalyse mit multidimensionalen Vektoren
cos (∠)	[-]	Inneres Produkt (cos)	Zeitreihenanalyse mit multidimensionalen Vektoren

Glossar

Anpassungsfaktor Mathematischer Faktor zur Einheitenkonvention zwischen Ergebnisparametern und Eingangsgrößen verschiedener Modelle

Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) Nach GefStoffV und TRGS 900 *“Grenzwert für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz in Bezug auf einen gegebenen Referenzzeitraum. Er gibt an, bei welcher Konzentration eines Stoffes akute oder chronische schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit von Beschäftigten im Allgemeinen nicht zu erwarten sind.”*

Berechnungsergebnisse Ergebnisgrößen, die durch die Anwendung von Berechnungsmodellen erzielt werden

Berechnungsmodell Abbildung der Wirklichkeit, die unter Berücksichtigung von Vereinfachungen anhand von mathematischen Gleichungen verschiedene Ergebnisgrößen (hier: infolge von Stofftransportvorgängen, s.u.) ermitteln;

Singuläre Modelle betrachten lediglich die Stoffemission oder -ausbreitung (s.u.), aber ggf. mehrere Stofftransportvorgänge;

Kombinatorische Modelle schließen von Emissionsbedingungen unter Berücksichtigung von Arbeitsbedingungen auf Stoffkonzentrationen, so dass Abschätzungen zur Stofffreisetzung und -ausbreitung zusammengefasst sind;

Generische Modelle bilden unter Berücksichtigung von physikalisch nicht zu belegenden Faktoren (z.B. zur Bewertung vorhandener Schutzmaßnahmen) bzw. zusammenfassender Kategorisierungen quantitative oder subquantitative Aussagen zur Exposition Beschäftigter (z.B. EMKG);

Emissionsmodelle dienen als singuläre Modelle der Abschätzung der Stofffreisetzung (z.B. durch Ermittlung von Emissions-Massenströmen);

Ausbreitungsmodelle dienen als singuläre Modelle der Abschätzung der Stoffausbreitung auf Grundlage von Emissionsparametern (z.B. zur Ermittlung von Stoffkonzentrationen);

Verdunstungsmodelle sind auf den Verdunstungsvorgang konzentrierte Emissionsmodelle

Brandschutzingenieurmodelle sind (Strömungs-) Modelle zur Berechnung der Rauchausbreitung, die auf die spezifischen Randparameter eines Brandes angepasst sind

Berechnungsszenario Gesamtheit der Rahmenbedingungen, die als Eingangsgrößen in ein Berechnungsmodell eingehen

Beurteilung Analyse und Bewertung eines Betrachtungsgegenstands, z.B. von Arbeitsbedingungen im Zuge der Gefährdungsbeurteilung

Charakteristische Parameter Physikalische Größen und Parameter, die den Verlauf und die Bedingungen des Stofftransports als funktionalen Zusammenhang beschreiben und die Vorgänge untereinander abgrenzen

- Eingangsparameter, -größen und -werte (modellspezifisch)** Einzelwert (z.B. einer Rahmenbedingung), die ein Modell zur Durchführung von Berechnungen benötigt
- Exposition** Tätigkeitsspezifische und arbeitsorganisatorische Bedingungen, die ein zeitliches Aufeinandertreffen des Hazard mit Beschäftigten ergeben
- Expositionsszenario** Nach REACH Verwendungsbedingungen, die u.a. der Inverkehrbringer den nachgeschalteten Anwendern, z.B. in Form spezifischer Verfahren oder Verwendungen, zur Beherrschung der Exposition empfiehlt
- Gefährdung** Möglichkeit eines Schadens ohne bestimmte Anforderungen an deren Ausmaß oder Eintrittswahrscheinlichkeit
- Grenzwertkonzept** Definition und (z.B. zeitbezogene) Ausrichtung von stoffbezogenen Grenzwerten
- Hazard** Grundlegende Gefährlichkeit eines Arbeitsmittels etc., die sich aus den inhärenten Eigenschaften (z.B. Emission von Lärm) ergibt
- Instationäre Bedingungen** Bedingungen oder Parameter, deren Verläufe sich zeitabhängig ändern (z.B. in Anfangsphase nach Emissionsbeginn)
- Lüftungsbedingungen bzw. -verhältnisse** Charakterisierung der Raumlüftung (Zu- und Abluft), z.B. über den Luftwechsel oder Zuluft- und Abluft-Volumenströme, mitsamt der entsprechenden Strömungsgeschwindigkeiten
- Messbedingungen** Gesamtheit der Rahmenbedingungen (s.u.), die im Zuge von Messungen ermittelt werden
- Messergebnisse bzw. -werte** Ausprägung und Verläufe von Parametern, die durch Messungen ermittelt werden und auf die diese Messungen abzielen
- Parametrisierung** Programmierung eines Berechnungsmodells mit den verschiedenen Eingangsgrößen eines Berechnungsszenarios bzw. dessen Übertragung in das Berechnungsmodell
- Plume** Thermisch bedingte, aufwärts gerichtete Rauchströmung über der Brandfläche, in der der Massenstrom durch turbulent eingemischte Umgebungsluft zunimmt und sich gleichzeitig Temperatur und Geschwindigkeit verringern
- Qualitative Vergleiche** Visueller Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen zur prinzipiellen Feststellung zeitabhängiger Unter- oder Überschätzungen
- Quantitative Vergleiche** Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen durch Ermittlung und Interpretation von statistischen Kennwerten der Zeitreihenanalyse
- Rahmenbedingungen** Allgemein Umgebungsbedingungen (z.B. geometrisch, thermodynamisch, strömungsmechanisch, arbeitsorganisatorisch), die die Tätigkeit bzw. die Arbeitsbedingungen beeinflussen
- Rechnerisches Gesamtverfahren** Umfassendes Vorgehen zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, das auf Berechnungsmodellen beruht und entsprechende Schnittstellen (s.u.) zwischen diesen zur geschlossenen Anwendung definiert
- Referenzbedingungen** Messbedingungen, die im Zuge von Validierungsmessungen vorherrschen und diese beeinflussen

- Referenzwerte** Ergebnisse von Validierungsmessungen, anhand denen die Überprüfung von Berechnungsmodellen vorgenommen wird
- Schnittstelle bzw. Verknüpfung** Verbindung zwischen verschiedenen Modellen innerhalb eines rechnerischen Gesamtverfahrens zur Kommunikation von Berechnungsergebnissen, die ggf. durch die Verwendung von Anpassungsfaktoren definiert wird
- Sensitivitätsbetrachtung bzw. -untersuchung** Überprüfung des Einflusses verschiedener Eingangsparameter auf Berechnungsergebnisse durch gezielte Veränderung bzw. Variation
- Stationäre Bedingungen** Gleichbleibende Bedingungen bzw. Parameterverläufe, für die keine Zeitabhängigkeit besteht
- Stoffausbreitung** Verbreitung in der Raumluft und Bildung ortsabhängiger Konzentrationen, auch als Transmission bezeichnet
- Stoffemission bzw. -freisetzung** Freisetzung eines Gefahrstoffes in die räumliche Umgebungsluft
- Stofftransportvorgänge** Physikalische Vorgänge, die einen Stofftransport bei der Emission oder Ausbreitung bewirken
- Validierung** Als Kernpunkt von Definitionen unterschiedlicher Disziplinen *“Ermittlung der Abweichung von Berechnungsergebnissen von der Realität (z.B. anhand von Messdaten)”*
- Verifikation** Als Kernpunkt von Definitionen unterschiedlicher Disziplinen *“Ermittlung von Rechenfehlern innerhalb von Algorithmen eines Berechnungsmodells”*
- Versuchsszenario** Definition gezielt veränderbarer Rahmenbedingungen von Validierungsversuchen, in denen sich diese unterscheiden und die unterschiedliche Betrachtungsfälle bilden

Literaturverzeichnis

- [1] *Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV)*. Fassung November 2010 (zuletzt geändert: Juli 2013), Bundesgesetzblatt I, S. 2514
- [2] LEHDER, Günther ; SKIBA, Reinald: *Taschenbuch Arbeitssicherheit*. 11. Auflage. Berlin : Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., 2005
- [3] KAHL, Anke: *Vorlesungsreihe Arbeitssicherheit - Abschnitt Inhalt und Umfang der Arbeitssicherheit*. Bergische Universität Wuppertal, 2013
- [4] *Risk Assessment in the Federal Government*. National Academy Press, Washington D.C., USA : Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, National Research Council, 1983
- [5] HOINKIS, Jan ; LINDNER, Eberhard: *Chemie für Ingenieure*. Wiley-VCH, 2001
- [6] BRAUER, Heinz: *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg New York, 1996
- [7] *Abbildung erstellt durch Autor*
- [8] OBERKAMPF, William L. ; TRUCANO, Timothy G.: *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics*. Albuquerque, New Mexico, USA : Sandia National Laboratories, März 2002
- [9] EICKMANN, Udo: *Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen*. Landsberg/Lech : Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm GmbH, 2008
- [10] BUNKE, Dirk ; GROSS, Rita ; SCHNEIDER, Klaus ; OLTMANN, Jan: *REACH Praxisführer zur Expositionsbewertung und zur Kommunikation in den Lieferketten - Teil 4: Vertiefungskapitel Expositionsabschätzung*. Verband der chemischen Industrie, 2009
- [11] MCGRATTAN, Kevin ; MCDERMOTT, Randall ; PRASAD, Kuldeep ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, September 2010
- [12] MCGRATTAN, Kevin ; MCDERMOTT, Randall ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, September 2010
- [13] PILLAR, Florian: *Übertragbarkeit von ausgewählten Brandschutzingenieurmodellen auf die Ausbreitung von Gefahrstoffen am Arbeitsplatz*, Bergische Universität Wuppertal, Master-Thesis, 2009

- [14] PILLAR, Florian: Ausgewählte Berechnungsmodelle zur Beschreibung von Gefahrstoffexpositionen an Arbeitsplätzen. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* (2014)
- [15] PILLAR, Florian: Ausgewählte Berechnungsmodelle zur Beschreibung von Gefahrstoffexpositionen an Arbeitsplätzen - Ergänzende Erläuterungen. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* (unter www.arbeitssicherheit.uni-wuppertal.de) (2014)
- [16] *Vertrag über die Arbeitsweise der europäischen Union*. Fassung 2008 (zul. geändert am 01.07.2013, in Amtsblatt Nr. C 115, 2008, S. 47)
- [17] *Vertrag über die europäische Union - Vertrag von Maastricht*. Fassung 1992, in Amtsblatt Nr. C 191, 1992
- [18] *Vertrag von Lissabon zur Änderung des Vertrags über die europäische Union und des Vertrags zur Gründung der europäischen Gemeinschaft*. in Amtsblatt Nr. C 306, 2007
- [19] *Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG*. Fassung 2006, in Amtsblatt EU Nr. 157, 2006, S. 24 ff.
- [20] *Europäische Union: Eur-Lex - Zugang zum EU-Recht*, <http://eur-lex.europa.eu/homepage.html?locale=de>
- [21] *Vertrag zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft*. Verhandlungen des Deutschen Bundestages, 2. Wahlperiode, 1953, Drucksache Nr. 3434, Anlage B
- [22] *Richtlinie 67/548/EWG des Rates vom 27. Juni 1967 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe*. Fassung 1967 (zuletzt geändert 2006 durch EG-Richtlinie 2006/121), in Amtsblatt EG Nr. 196, 1967
- [23] *Richtlinie 99/45/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 31. Mai 1999 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für die Einstufung, Verpackung und Kennzeichnung gefährlicher Zubereitungen*. in Amtsblatt Nr. L 200, 1999, S. 1
- [24] *Richtlinie 91/155/EWG der Kommission zur Festlegung der Einzelheiten eines besonderen Informationssystems für gefährliche Zubereitungen gemäß Artikel 10 der Richtlinie 88/379/EWG des Rates*. in Amtsblatt Nr. L 76, 1991, S. 35 (zuletzt geändert: in Amtsblatt Nr. L 212, 2001, S. 24)
- [25] *Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.12.2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/755/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission*. Fassung 2006 (zuletzt geändert Mai 2007, berichtigt Februar 2009), in Amtsblatt Nr. L 136, 2007 (Berichtigung in Amtsblatt Nr. L 34/84, 2009)
- [26] GUTBERLET, Anna ; ROTHER, Dag ; WIECKO, Michal ; ROITZSCH, Michael: *REACH-Info 11: REACH - Expositionsabschätzung für den Arbeitsschutz*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2014
- [27] *REACH-Helpdesk Deutschland*: <http://www.reach-clp-helpdesk.de>

- [28] *Leitlinien zur Registrierung*. Helsinki, Finnland : Europäische Chemikalienagentur, 2008
- [29] *Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006*. in Amtsblatt Nr. L 353, 2008, S. 1
- [30] *Einführende Leitlinien zur CLP-Verordnung*. Helsinki, Finnland : Europäische Chemikalienagentur, 2009
- [31] *Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz - ChemG)*. in Bundesgesetzblatt I, 2013, S. 3498 und S. 3991
- [32] *TRGS 200 - Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen, Zubereitungen und Erzeugnissen*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 42/43, S.831 2011 : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Oktober 2011
- [33] *Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit*. in Amtsblatt Nr. L 183, 1989, S. 1
- [34] *Richtlinie 98/24/EG des Rates vom 7. April 1998 zum Schutz von Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch chemische Arbeitsstoffe bei der Arbeit*. in Amtsblatt Nr. L 131, 1998, S. 11
- [35] *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG)*. Fassung August 1996 (zuletzt geändert: Oktober 2013), in Bundesgesetzblatt I, 2009, S. 160
- [36] *TRGS 500 - Schutzmaßnahmen*. Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Januar 2008 (ergänzt: Mai 2008)
- [37] *DGUV Information 213-033: Gefahrstoffe in Werkstätten*. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Arbeitskreis Gefahrstoffe, Ausgabe: Februar 2012
- [38] *Gesetz über Betriebsärzte, Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit - ASiG*. Fassung Dezember 1973 (zuletzt geändert April 2013), in Bundesgesetzblatt I, 1973, S. 1885
- [39] *TRGS 460 - Handlungsempfehlung zur Ermittlung des Standes der Technik*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 59, S.1175-1191 2013 (berichtigt in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 3/4, S. 72 2014) : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Oktober 2013 (berichtigt: 2014)
- [40] *TRGS 400 - Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 40, S.715 2012 : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Dezember 2010 (zuletzt geändert und ergänzt: September 2012)
- [41] *TRGS 402 - Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 12, S.254-257 2014 : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Januar 2010 (zuletzt geändert und ergänzt: April 2014)
- [42] *DIN EN 482 - Arbeitsplatzatmosphäre - Allgemeine Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Verfahren zur Messung chemischer Arbeitsstoffe*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Juni 2012

- [43] *DIN EN 689 - Arbeitsplatzatmosphäre - Anleitung zur Ermittlung der inhalativen Exposition gegenüber chemischen Stoffen zum Vergleich mit Grenzwerten und Meßstrategie*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, April 1995
- [44] *TRGS 401 - Gefährdung durch Hautkontakt - Ermittlung, Beurteilung, Maßnahmen*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 9, S.175 2011 : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Juni 2008 (zuletzt berichtet: März 2011)
- [45] *TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte*. in: Gemeinsames Ministerialblatt Nr. 12, S.271-274 2014 : Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), Ausgabe: Januar 2006 (zuletzt geändert und ergänzt: April 2014)
- [46] GRÜNEWALD, Michael: *Vorlesungsreihe Brandverhalten von Materialien - Abschnitt Rauchgastoxizität*. Bergische Universität Wuppertal, 2008
- [47] *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. in Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L88/5, 2011
- [48] *Berichtigung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. in Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L103/10, 2013
- [49] *Richtlinie des Rates von 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Baurodunkte (89/106/EWG), zuletzt geändert durch die Verordnung (EG) Nr. 1882/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. September 2003*
- [50] SCHNEIDER, Bernhard: Die neue EU-Bauproduktenverordnung. In: *Symposium CE-Kennzeichnung in der Straßenausstattung* Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt), 10. Mai 2011 (Bergisch-Gladbach)
- [51] SCHNEIDER, Bernhard: *Telefonkorrespondenz, Thema: EU-Bauproduktenverordnung und Gültigkeit der Grundlagendokumente nach 89/106/EWG*. – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [52] *Grundlagendokument - Wesentliche Anforderung Nr. 2 - "Brandschutz"*. in Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften C 63, 28.02.1994
- [53] *Normenreihe DIN EN 3 - Tragbare Feuerlöscher*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag
- [54] *Gesetz zur Durchführung der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Umsetzung und Durchführung anderer Rechtsakte der Europäischen Union in Bezug auf Bauprodukte (Bauproduktengesetz - BauPG)*
- [55] *Gesetz zur Anpassung des Bauproduktengesetzes und weiterer Rechtsvorschriften an die Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten*. Fassung Dezember 2012
- [56] *Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen - Landesbauordnung (BauO NRW)*. Fassung März 2000 (zuletzt geändert: Mai 2014)

- [57] *Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Versammlungsstättenverordnung - VStättV)*. Fassung November 2007 (zuletzt geändert April 2013)
- [58] *Normenreihe DIN 4102 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag
- [59] *Musterbauordnung - MBO*. Fassung November 2002 (zuletzt geändert September 2012), auf www.is-argebau.de
- [60] *Muster-Verordnung über die Prüffingenieure und Prüfsachverständigen nach § 85 Abs. 2 MBO*. Fassung Dezember 2012, auf www.is-argebau.de
- [61] *Muster einer Verordnung über Bauvorlagen und bauaufsichtliche Anzeigen (Musterbauvorlagenverordnung) - MBauVorIV*. auf www.is-argebau.de, Fassung Februar 2007
- [62] *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie - MIndBauRL)*. Fassung Februar 2014 (EU-Notifizierung zum 16.07.2014 ausstehend), auf www.is-argebau.de
- [63] HOSSER, Dietmar (Hrsg.): *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, November 2013 (3., überarbeitete und ergänzte Auflage)
- [64] PEACOCK, Richard D. ; RENEKE, Paul A. ; FORNEY, Glenn P.: *CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) - Technical Reference Guide*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, März 2013
- [65] PEACOCK, Richard D. ; FORNEY, Glenn P. ; RENEKE, Paul A.: *CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) - User's Guide*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, März 2013
- [66] MCGRATTAN, Kevin ; MCDERMOTT, Randall ; PRASAD, Kuldeep ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 2: Verification*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, September 2010
- [67] MCGRATTAN, Kevin ; MCDERMOTT, Randall ; PRASAD, Kuldeep ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide, Volume 3: Validation*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, 2009
- [68] KEIL, Charles B.: *Mathematical Models for Estimating Occupational Exposure to Chemicals*. Fairfax, USA : American Industrial Hygiene Association (AHIA), 2000
- [69] BOSCH, C.J.H. van d. (Hrsg.) ; WETERINGS, R.A.P.M. (Hrsg.): *Methods for the calculation of physical effects*. Third Edition - Second revised Print. Den Haag : Committee for the Prevention of Disasters, 2005
- [70] EICKMANN, Udo: *Wie sicher sind Aussagen zu Expositionen am Arbeitsplatz*. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* Nr. 6 (Juni 2007)
- [71] LINDNER, Helmut ; SIEBKE, Wolfgang (Hrsg.) ; SIMON, Günter (Hrsg.) ; WUTTKE, Werner (Hrsg.): *Physik für Ingenieure*. 17. Auflage. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006

- [72] KAISER, W. ; ROGAZEWSKI, P. ; SCHINDLER, M. ; ACIKALIN, A. ; ALBRECHT, M. ; LAMBERT, M. ; STEINBACH, J.: *Forschungsbericht 297 48 428 UBA-FB 000039/1 - Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszzenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift, Band 1 und 2*. Berlin : Umweltbundesamt, 2000
- [73] OERTEL, Herbert jr. ; BÖHLE, Martin ; DOHRMANN, Ulrich: *Strömungsmechanik - Grundlagen, Grundgleichungen, Lösungsmethoden, Softwarebeispiele*. Bd. 5. Auflage. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2009
- [74] MACKAY, Donald ; MATSUGU, Ronald S.: Evaporation Rates of liquid Hydrocarbon Spills on Land and Water. In: *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 51 (1973), August, S. 434–439
- [75] *Kapitel* Evaporation of pure Liquids from open Surfaces. In: LINDERS, J.H.B.J. (Hrsg.): *Modelling of Environmental Chemical Exposure and Risk*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands : Frederic C. Arnold and Alfred J. Engel, 2001, S. 61–71
- [76] WEIDLICH, U. ; GMEHLING, J.: *Expositionsabschätzung - Ein Methodenvergleich mit Hinweisen für die praktische Anwendung*. Dortmund : Wirtschaftsverlag NW - Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 1986
- [77] MARZINKOWSKI, Joachim M.: *Vorlesungsreihe Chemie II*. Bergische Universität Wuppertal, 2008
- [78] SCHRAMEK, Ernst-Rudolf ; RECKNAGEL, Hermann ; SPRENGER, Eberhard: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. Bd. 74. Auflage. München : Oldenbourg Industrieverlag, 2008
- [79] TRUCKENBRODT, Erick: *Fluidmechanik: Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge*. 4. Auflage. München : Springer Berlin Heidelberg New York, 1996 (Nachdruck in veränderter Ausstattung 2008)
- [80] DiNENNO, Philip J. (Hrsg.): *SFPE Handbook of Fire Protection*. 4th. National Fire Protection Association, 2008
- [81] KARLSSON, Björn ; QUINTIERE, James G.: *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton, USA : CRC Press, 2000
- [82] SCHNEIDER, Ulrich: *Ingenieurmethoden im Brandschutz*. Bd. 2. Auflage. Köln : Werner Verlag, 2009
- [83] EICKMANN, Udo: *Persönliche Korrespondenz*
- [84] *DIN EN ISO 8996 - Ergonomie der thermischen Umgebung - Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 2005
- [85] KAMPMANN, Bernhard: *Zur Physiologie der Arbeit in warmem Klima. Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und Feldstudien im Steinkohlenbergbau*. Wuppertal : Bergische Universität Wuppertal, 2000
- [86] KAMPMANN, Bernhard: *Persönliche Korrespondenz*
- [87] *DIN 33402: Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Dezember 2005
- [88] FORNEY, Glenn P.: *Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume I: User's Guide*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, August 2013

- [89] FORNEY, Glenn P.: *Smokeview (Version 6) - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume II: Technical Reference Guide*. Washington, USA : National Institute of Standards and Technologie, August 2013
- [90] STANDARDS, National I. ; TECHNOLOGY (NIST), USA: *National Institute of Standards and Technology (NIST), USA: Fire Dynamics Simulator - Release Notes*, http://code.google.com/p/fds-smv/wiki/FDS_releaseNotes
- [91] ANDERSON, Johan ; JANSSON, Robert: *Facade Fire Tests - Measurements and Modeling*. In: *Interflam 2013*. Boras, Sweden : Royal Holloway College, London (UK), 2013
- [92] PILLAR, Florian: *Validierungskonzept zur Untersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen*. Bergische Universität Wuppertal, 2013
- [93] KREISS, Jens-Peter ; NEUHAUS, Georg: *Einführung in die Zeitreihenanalyse*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [94] MÜNCH, Matthias: *Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr*. Berlin, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss., 2013
- [95] PILLAR, Florian: *Validierungsuntersuchung eines Berechnungsverfahrens zur Gefährdungsbeurteilung von Tätigkeiten mit Gefahrstoffen - Wissenschaftlicher Abschlussbericht / Bergische Universität Wuppertal*. Wuppertal, 2014. – Forschungsbericht
- [96] BÜNGER, Jürgen ; MONSÉ, Christian ; SUCKER, Kirsten ; BRODING, H. C. ; PALLAPIES, Dirk ; KÄFFERLEIN, Heiko ; MERGET, Rolf ; BRÜNING, Thomas: *Das Expositionslabor des IPA - Teil 1: Expositionsgenerierung und -überwachung*. In: *IPA-Journal* (2012), 13-16, Nr. 03
- [97] BÜNGER, Jürgen ; SUCKER, Kirsten ; BRODING, Christoph ; RAULF, Monika ; MONSÉ, Christian ; JETTKANT, Birger ; BERRESHEIM, Hans ; HOFFMEYER, Frank ; WEISS, Tobias ; KÄFFERLEIN, Heiko ; HAGEMeyer, Olaf ; MERGET, Rolf ; THRIEL, Christoph van ; BRÜNING, Thomas: *Das Expositionslabor des IPA - Teil 2: Messung und Bewertung akuter Effekte mit Hilfe physiologischer Parameter, nicht-invasiver Methoden und Biomonitoring*. In: *IPA-Journal* (2013), 9-11, Nr. 03
- [98] MONSÉ, Christian: *Persönliche Korrespondenz*
- [99] HELLENKAMP, Eike: *Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Kohlenstoffmonoxid und Ableitung von Schutzmaßnahmen für Privathaushalte*. Wuppertal : Master-Thesis, Bergische Universität Wuppertal, 2012
- [100] ASRA3.6 - *Lüftung*. in: *Gemeinsames Ministerialblatt S.92 2012 (Änderung in: Gemeinsames Ministerialblatt S. 359 2013)* : Ausschuss für Arbeitsstätten, Ausgabe: Januar 2012 (zuletzt geändert: Februar 2013)
- [101] *erstellt durch: Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung*
- [102] MS4 Analysentechnik GmbH: *Prozess-Massenspektrometer, Modell Airsense - Datenblatt*, www.ms4.info
- [103] VOHR, Hans-Werner (Hrsg.): *Toxikologie: Band 2 - Toxikologie der Stoffe*. Weinheim : Wiley-VCH, 2010

- [104] CAGNA, Michele: *Vorlesungsreihe Thermo- und Strömungsdynamik II*. Bergische Universität Wuppertal, 2007
- [105] SIGLOCH, Herbert: *Technische Fluidmechanik*. Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [106] HABIB, Abdelkarim: *Instationäre Berechnung der Lachenverdunstung mittels eines Grenzschichtverfahrens*. Berlin, Technische Universität Berlin, Diss., 2011
- [107] LUCAS, Klaus: *Thermodynamik - Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2008
- [108] ATKINS, Peter W. ; PAULA, Julio de: *Physikalische Chemie*. Bd. 4., vollständig überarbeitete Auflage. Weinheim : Wiley-VCH, 2006
- [109] ATKINS, Peter W. ; JONES, Loretta: *Chemie - Einfach alles*. Weinheim : Wiley-VCH, 2006
- [110] CUSSLER, E.L.: *Diffusion - Mass Transfer in fluid Systems*. Third Edition. New York : Cambridge University Press, 2009
- [111] JOB, Georg ; RÜFFLER, Regina: *Physikalische Chemie - Teil 1: Grundzüge der Stoffdynamik*. www.job-stiftung.de : Job-Stiftung, 2008
- [112] POPE, Stephen B.: *Turbulent Flows*. New York : Cambridge University Press, 2005
- [113] RINALDI, Piercristian: *Über das Verhalten turbulenter Freistrahlen in begrenzten Räumen*. Technische Universität München - Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, 2003
- [114] WITTBECKER, Friedrich-Wilhelm: *Vorlesungsreihe Grundlagen des Brand- und Explosionsschutzes*. Bergische Universität Wuppertal, 2008

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiele stoffspezifischer Aspekte des Gefährdungsmodells [3, 4]	2
1.2	Überblick der Ablauffolge stoffspezifischer Wirkungsvorgänge [7]	2
1.3	Überblick der Konzepte von Brandschutzingenieurmodellen [7]	4
1.4	Überblick der methodischen Vorgehensweise [7]	7
2.1	Aufbau der europäischen und nationalen Rechtssystematik [7]	12
2.2	Auszug zur Rechtsstruktur der stoffspezifischen Produktsicherheit [7]	14
2.3	Ablauf der stoffspezifischen Gefährdungsbeurteilung [7]	17
2.4	Schutzzielkonzept für Gefahrstoffe [7]	19
2.5	Auszug struktureller Zusammenhänge der Gesetzgebung zur Planung und Errichtung von Gebäuden [7]	25
5.1	Schrittfolge zur Gefährdungsbeurteilung nach GefStoffV mit Berechnungsmodellen (basierend auf [41]) [7]	56
5.2	Entscheidungsbaum zur Modellauswahl der Stoffemission [7]	65
5.3	Entwickeltes Konzept der Wuppertaler Expositions-Abschätzung [7]	79
6.1	Planskizze des Versuchsraums im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [7]	88
6.2	Übersichten des Versuchsraums im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [7]	88
6.3	Überblick Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (halbtransparente Darstellung) [7]	91
6.4	Aufsicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (intransparente Darstellung) [7]	91
6.5	Vorderansicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (Schnitt vordere Wand) [7]	91
6.6	Seitenansicht Berechnungsgeometrie im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 (Schnitt rechte Wand) [7]	91
6.7	Prinzipskizzen des IPA-Expositionslabors [101]	107
6.8	Innenansichten des IPA-Expositionslabors [101]	107
6.9	Berechnungsgeometrie des IPA-Expositionslabors [7]	110
6.10	Qualitativer Vergleich zur Homogenität orsbezogener Konzentrationen [7]	117
6.11	Berechnungsgeometrie für Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten [7]	122
7.1	Angepasstes Konzept der Wuppertaler Expositions-Abschätzung [7]	142

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der Rahmenbedingungen zu rechnerischen Betrachtungen des Arbeits- und Brandschutzes	26
4.1	Überblick zur Beurteilung von Emissionsmodellen	40
4.2	Überblick zur Beurteilung von Ausbreitungsmodellen	50
5.1	Pauschale Abschätzung menschlicher Körpermaße im Modell FDS	70
5.2	Zusammenfassung der Anpassungsfaktoren der Emissionsmodelle	76
5.3	Zusammenfassung von Eingangsgrößen der Emissionsmodelle aus Vorbetrachtungen	76
6.1	Zusammenfassung der Positionierung von Messpunkten im DGUV-Forschungsprojekt FP 354	89
6.2	Änderungen der Versuchsbedingungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354	90
6.3	Nummerierungssystem Versuche und Berechnungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354	90
6.4	Übersicht methodischer Berechnungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354	92
6.5	Zusammenfassung von Messpunkten in Versuchen zum CO-Ausbreitungsverhalten	121
6.6	Zusammenfassung der Vergleiche von Konzentrationsverläufen (CO-Versuche) . .	126
A.1	Charakteristische Parameter gasförmiger Emissionen durch Öffnungen[105] . . .	146
A.2	Charakteristische Parameter der Verdunstung aus Flüssigkeitsoberflächen [106, 107]	147
A.3	Charakteristische Parameter der Verdampfung aus Flüssigkeitsoberflächen [106, 107]	148
A.4	Charakteristische Parameter der Sublimation aus Feststoffoberflächen [108, 109]	149
A.5	Charakteristische Parameter der Diffusion [9, 108, 110]	150
A.6	Charakteristische Parameter der Stoffausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen [73, 111]	151
A.7	Charakteristische Parameter der Eigenströmungen infolge impulsbehafteter Stoffemissionen [78, 112, 113]	153
A.8	Charakteristische Parameter der dichtebedingten Stoffausbreitung [79]	154
A.9	Charakteristische Parameter des Arbeitsraums, der Umgebungsbedingungen und der Arbeitsorganisation	156
B.1	Parametervergleich zum Modell der Gas-Emission aus Behältern	157
B.2	Parametervergleich zum SVP-Modell (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche) . .	158
B.3	Parametervergleich zum CEM-Modell (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche) .	159
B.4	Parametervergleich zum Verdunstungsmodell nach Mackay und Matsugu (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)	160

B.5	Parametervergleich zum Verdunstungsmodell nach Weidlich und Gmehling (Verdunstung aus Flüssigkeitsoberfläche)	162
B.6	Parametervergleich zum theoretischen Verdampfungs- und Sublimationsmodell (Verdampfung aus Flüssigkeitsoberfläche bzw. Sublimation)	163
B.7	Parametervergleich zum Diffusionsmodell (Stoffausbreitung durch Diffusion)	163
B.8	Parametervergleich zu arbeitsschutzbezogenen Zonenmodellen (Ausbreitung durch Mitführung in Luftströmungen)	165
B.9	Parametervergleich zu Strahlgesetzen (Eigenströmung infolge impulsbehafteter Emission)	166
B.10	Parametervergleich zur Abschätzung der dichtebedingten, vertikalen Schichtung gasförmiger Stoffe (Dichtebedingter Auf- oder Abtrieb)	167
B.11	Parametervergleich zum stoffbezogenen Ausbreitungsmodell des Brandschutzingenieurmodells FDS	172
B.12	Zuordnung charakteristischer Parameter zu Arbeitssystemelementen	174
C.1	Zuordnung der farblichen Markierung zu Emissionsmodellen	175
C.2	Abschließende Konkretisierung des Arbeitssystems als Methodik zur Erfassung benötigter Eingangsgrößen	180
E.1	Vergleichsmatrix zwischen Rahmenbedingungen der Tätigkeit und Modellansätzen zur Stoffemission	187
F.1	Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen im DGUV-Forschungsprojekt FP 354 [95]	201
F.2	Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen der Kalibrierversuche im IPA-Expositions-labor [96–98]	207
F.3	Arbeitssystem der Validierungsuntersuchungen der Versuche zum CO-Ausbreitungsverhalten [99]	212
G.1	Besondere Merkmale einzelner Versuche im DGUV-Forschungsprojekt FP 354	217
H.1	Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs-Gesamtmassen (gerundet)	233
H.2	Tabellarischer Vergleich gemessener und berechneter Verdunstungs- Massenströme	234

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.